

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Wenn einen plötzlich der Schlag trifft

Jogger leben nicht länger, aber sie sterben gesünder.“ Dieser populäre Spruch der Fitnessbewegung ist so flott wie falsch. Bewegungsmangel ist eine der tieferen Ursachen für Herz- oder Kreislauf-Krankheiten. Daran sterben über die Hälfte aller Menschen in Deutschland, über 400 000 pro Jahr – keine gute Nachricht.

Denn trotz angeblich bester medizinisch-technischer Behandlungsverfahren liegen wir damit um zwanzig Prozent über dem Durchschnitt in der EU. „Es wird zu viel behandelt“, sagt beispielsweise Rolf Stuppart, Vorsitzender des Bundesverbands der Innungskrankenkassen, und „zuwenig Vorsorge, Prävention und Gesundheitsförderung“ betrieben.

Gesundheitsexperten vertreten die Ansicht, dass sich die Zahl dieser Todesfälle durch mehr Bewegung halbieren ließe. Andere Risikofaktoren – Rauchen, fette Ernährung, Bluthochdruck und Stress – könnten bei gesünderem Verhalten gleichfalls gemindert werden. Ärzte empfehlen, wie für vieles andere auch, vitaminreiche Kost. Auch Teetrinker sind nachweislich besser dran. So haben niederländische Forscher 4800 gesunde Personen sechs Jahre lang beobachtet. Tranken diese pro Tag etwa 0,4 Liter schwarzen Tee, so halbierte sich ihr Risiko für einen Herzinfarkt; und die Gefahr, an einem Infarkt zu sterben, sank sogar um siebzig Prozent.

Wer solche Ratschläge befolgt, der kann zweifellos mit einer höheren Lebenserwartung rechnen. Das ist die Lifestyle-Seite. Doch obwohl „Gesundheit“ in den wohlhabenden Ländern der Ersten Welt zum modernen Fetisch erhoben wurde, ist nicht zu erwarten, dass die Menschen mehrheitlich zu einem vernünftigeren Lebensstil wechseln. Eher werden sie Gesundheit weiterhin als käufliches Gut betrachten.

Auf der anderen Seite kann auch die Erforschung von Herzattacken offenbar noch zulegen. Wie unsere Titelgeschichte ab Seite 48 zeigt, hat sich in letzter Zeit das Bild vom Herzinfarkt gewandelt. Auslöser sei nicht unbedingt eine Verengung der Herzkranzgefäße, sondern Entzündungen der Gefäßwände. Die Forscher sehen darin Ansätze für neue Heilverfahren.

Wie alle solchen Perspektiven wird sich auch die neue Herzinfarktforschung einmal positiv auf die Lebenserwartung auswirken. Wenn die Demographen Recht behalten, wird die Lebenserwartung von heute 85 Jahren bis zum Jahre 2060 auf 100 Jahre angestiegen sein. Vor „Anti-Aging“ und modischer Jungbrunnen-Industrie warnen Altersforscher jedoch. Altern lasse sich weder verlangsamen noch anhalten oder gar umkehren. Es lasse sich aber gesünder erleben – etwa durch Jogging. Abwarten und Teetrinken.



Als einzige übriggebliebene Menschenart bevölkert heute der *Homo sapiens sapiens* die Erde. Unser neues **Compact II „Evolution des Menschen“** führt spannend vor Augen, wie es dazu kam – die Geschichte eines Wesens, das „weiß, dass es weiß“.




TITELBILD:

Jeder Zehnte in Deutschland stirbt an einem Herzinfarkt, weil die versorgenden Arterien verkalken. Nach neueren Erkenntnissen spielen bei allen Etappen einer Arteriosklerose entzündliche Prozesse mit, die es zu bekämpfen gilt.
Bild: Jeff Johnson, Hybrid Medical Animation



TITELTHEMA: MEDIZIN

Arteriosklerose als Entzündung

Arteriosklerose fordert mehr Todesopfer als Krebs, vor allem durch ihre lebensbedrohlichen Folgen wie Herzinfarkt. Das neue Entstehungsmodell der „Arterienverkalkung“ erklärt, warum auch viele scheinbar Gesunde einen Infarkt erleiden.

Seite 48

EVOLUTION

Wale der Urzeit

DNA-Vergleiche stellen scheinbar gesichertes Wissen über die Herkunft der Meeressäuger in Frage. Ist ein Wal vielleicht eine Art Flusspferd?



Seite 26



ASTRONOMIE

Aufbruch zum Pluto

Eine Raumsonde soll den fernsten Planeten besuchen und anschließend in den Kuiper-Gürtel weiterfliegen, um den weitgehend unerforschten Rand unseres Sonnensystems zu erforschen.

Seite 36

METEORITENEINSCHLÄGE

Tödliche Treffer in Serie

Eine kosmische Bombe hat höchstwahrscheinlich vor 65 Millionen Jahren die Dinosaurier ausgelöscht. Gehen womöglich auch andere, frühere Massensterben auf das Konto verheerender Einschläge kilometergroßer Meteoriten? Die Anzeichen dafür mehren sich.

Seite 60

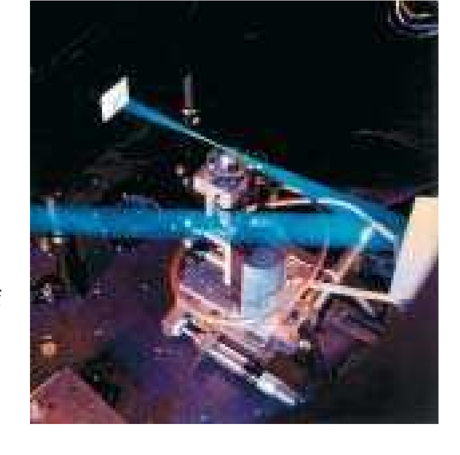


LASERTECHNIK

Extrem intensive Laserblitze

Kompakte Laborgeräte können heute Lichtpulse erzeugen, deren Intensität kurzzeitig der Leistung sämtlicher Kraftwerke auf der Erde gleichkommt. Solche gebündelten Laserblitze beschleunigen Elektronen über kürzeste Distanz fast auf Lichtgeschwindigkeit.

Seite 70



NEUROBIOLOGIE

Wunden, die nicht verheilen

Schwere Misshandlungen im frühen Kindesalter können die Entwicklung des kindlichen Gehirns so stark beeinträchtigen, dass dauerhafte Schäden zurückbleiben. Die Störungen der Hirnfunktion lassen sich noch im Erwachsenenalter nachweisen.

Seite 78

TECHNOSKOP-REPORT:

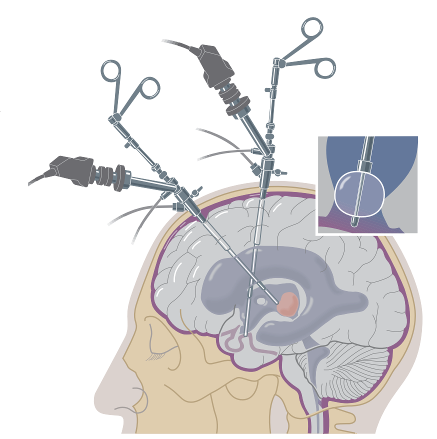
Moderne Endoskopie

Computer unterstützen den Blick durchs Schlüsselloch – oder ersetzen ihn sogar durch Simulation.

Seite 88

Einzelthemen:

- Virtuelle Endoskope
- Biopsie direkt
- Tasten mit Licht
- Tief im Schädel
- Bauchspiegelung
- Endoskop zum Schlucken



FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

REZENSIONEN

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

WEITERE RUBRIKEN

SEUCHENBEKÄMPFUNG

Aids: Impfstoff in Sicht?

Das menschliche Immunsystem gegen die Aids-Erreger zu aktivieren und so einen wirksamen Schutz gegen die weltweite Seuche aufzubauen, ist eine große Herausforderung.

Von Reinhard Kurth

Rund zwanzig Jahre ist es nun schon her, dass Aids – mittlerweile die schlimmste Seuche der Gegenwart – in das Bewusstsein der Öffentlichkeit rückte. Anfangs war die wissenschaftliche Fachwelt durchaus optimistisch: Menschlicher Erfindergeist könne schon bald, so meinte man, einen Impfstoff entwickeln und die erworbene Immunschwächekrankheit besiegen.

Zweifellos gab es Fortschritte. Der verursachende Erreger, das Human-Immunschwächevirus HIV und sein Erbmaterial wurden genauestens analysiert. Schließlich standen auch Medikamente zur Therapie der chronischen HIV-Infektion zur Verfügung. Doch die Bemühungen, einen Impfstoff zu entwickeln, brachten jahrelang nur Enttäuschungen: Alle experimentellen Vakzine, die in Tierversuchen eigentlich hätten erfolgreich immunisieren sollen, versagten.

Die traurige Wahrheit heute ist: Über vierzig Millionen Menschen sind gegenwärtig mit HIV infiziert oder haben bereits das volle Aids-Krankheitsbild entwickelt, über zwanzig Millionen Menschen sind bereits an Aids verstorben, und der erhoffte Impfstoff gegen den Aids-Erreger ist noch immer nicht wirklich in Sicht.

Nur ein wirksamer Impfstoff – und ein preiswerter dazu – wird die Aids-Pandemie eines Tages begrenzen können. Natürlich fragen sich nicht nur die Wissenschaftler, warum die Entwicklung eines Aids-Impfstoffs so schwierig ist.

Zuweilen wird die sehr hohe Variabilität der HIV-Partikel als Begründung angeführt. Diese Problematik ist von den echten Grippeviren her bestens bekannt. Auch wird angeführt, dass HIV in den verschiedenen Erdteilen in unterschiedlichen Stämmen auftritt, die sich immunologisch voneinander unterscheiden. Da wir aber derzeit nicht einmal gegen einen einzigen definierten HIV-Stamm einen Impfstoff besitzen, sind solche Einwände eher zweitrangig. Das größte Hindernis ist und bleibt, dass wir nicht einmal wissen, ob es überhaupt eine Immunität gegen HIV geben kann.

Weder in infizierten Menschen und Tieren, von denen einige durchaus lange Jahre überleben können, noch in Tieren, die zunächst experimentell immunisiert und danach infiziert wurden, konnte jemals eine dauerhaft schützende Immunität nachgewiesen werden. Hinzu kommt, dass es kein geeignetes Kleintiermodell gibt, um in größerer Zahl experimentelle Impfstoffe mit vielen Tieren zu prüfen. Erschwerend ist weiterhin, dass HIV gerade diejenigen Zellen des Immunsystems infiziert, die notwendig sind, um eine wirksame Immunantwort zu starten und aufrechtzuerhalten.

Ungeduldiges Warten auf die Schutzwirkung

Doch es sind nicht allein die großen wissenschaftlichen Schwierigkeiten in Design, Produktion und Prüfung experimenteller Impfstoffe. Es gibt auch erhebliche logistische, politische, finanzielle und ethische Probleme in Organisation und Analyse von klinischen Prüfungen im Menschen. Aus diesen Gründen verwundert es kaum, dass sich nur wenige große pharmazeutische Unternehmen in der Entwicklung eines Aids-Impfstoffs engagieren. Die entsprechende Grundlagen- und präklinische Forschung werden weitgehend in häufig unterfinanzierten Instituten durchgeführt.

Trotz dieser Schwierigkeiten hellt sich die Stimmung unter den Wissenschaftlern und in der interessierten Öffentlichkeit in letzter Zeit etwas auf, der frühere Fatalismus weicht einem vorsichtigen Optimismus. Grund hierfür ist die Entwicklung eines weiten Spektrums experimenteller Impfstoffe mittels biotechnologischer Methoden sowie einige begrenzte Erfolge in der Immunisierung von Rhesusaffen. Manche dieser Impfstoffe, die auch in Kombination verabreicht werden können, sind bereits in der klinischen Prüfung im Menschen. So ist zu hoffen, dass Impfstoffe der ersten Generation – mit vermutlich nur begrenzter Wirksamkeit – tatsächlich entwickelt werden können.

Zur Anwendung am Menschen müssen Impfstoffe drei Phasen der klinischen Prüfung erfolgreich bestehen:

➤ Zunächst wird an wenigen Freiwilligen die Sicherheit des Impfstoffs überprüft.
➤ Sodann wird die Immunogenität des Impfstoffs, also ob er eine messbare Immunantwort auslöst, an beispielsweise mehreren hundert Freiwilligen untersucht.
➤ In einer anschließenden dritten Phase an Tausenden von Freiwilligen muss die Frage nach der schützenden Wirksamkeit des Impfstoffs geklärt werden.

Derzeit gibt es nur einen einzigen Impfstoffkandidaten, Aidsvax genannt, der sich in der dritten Prüfungsphase befindet. Die Forscher warten ungeduldig auf die Ergebnisse zur Schutzwirkung, die bis zum Jahresende vorliegen sollen. Aidsvax besteht aus der gereinigten äußeren Hülle des Aids-Virus und induziert in erster Linie Antikörper gegen HIV. Auf Grund von Ergebnissen in Tierversuchen ist allerdings zu vermuten, dass die Induktion solcher Antikörper wenig schützend sein wird. Wirkungsvoller wäre vermutlich ein Impfstoff, der eine starke zelluläre Immunantwort gegen HIV-infizierte Zellen induziert, denn im Tierversuch entfaltete diese Art der Immunantwort am ehesten eine gewisse Schutzwirkung. Deshalb steht zu befürchten, dass Aidsvax nicht erfolgreich sein wird. Vielleicht irren aber auch die Skeptiker, worüber diese sicher selbst sehr glücklich wären.

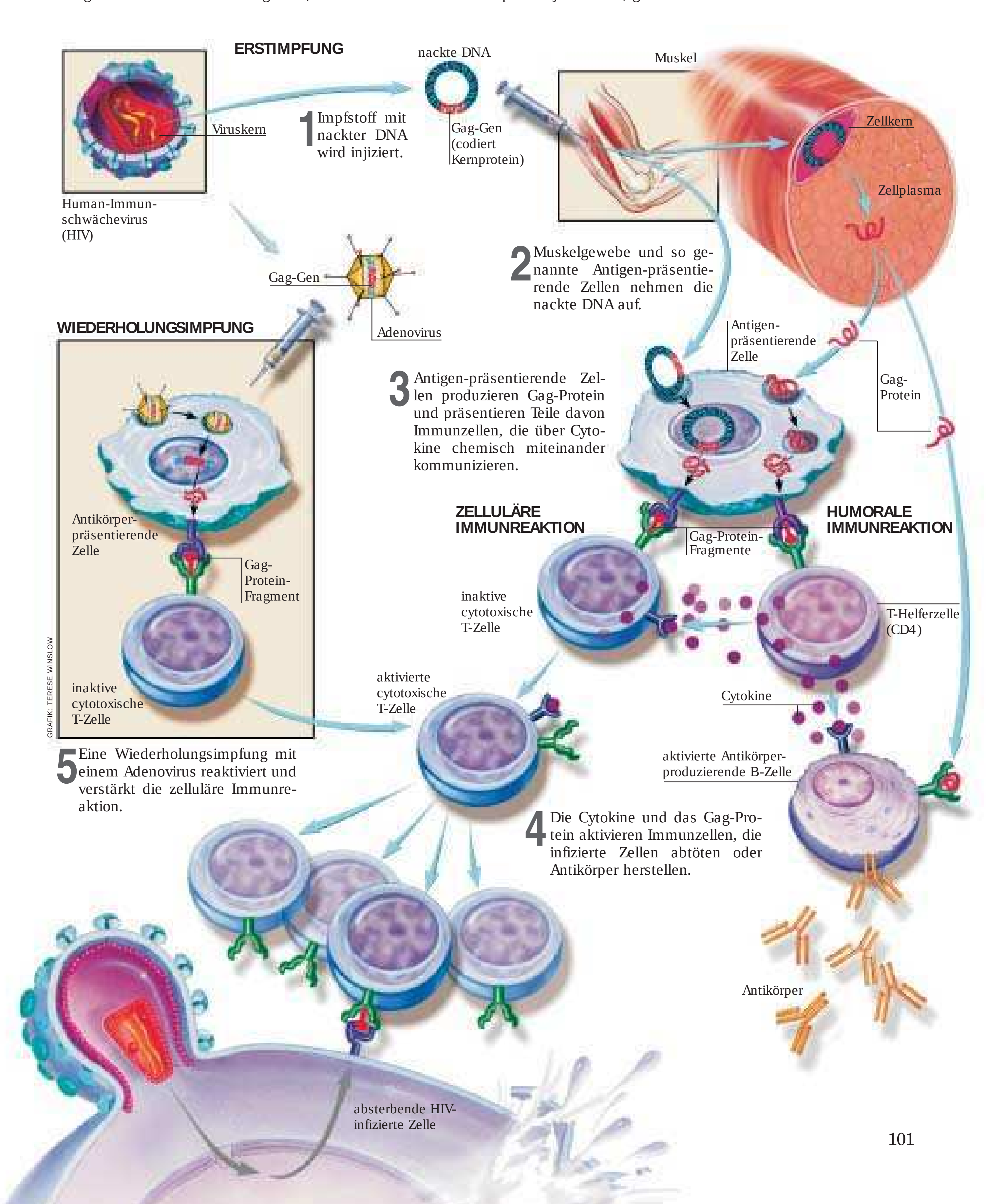
Doch selbst, wenn die dritte Prüfungsphase mit Aidsvax fehlschlagen sollte, wird ein Trostpflaster bleiben: Aus den Erfahrungen werden die Forscher gelernt haben, wie solche umfangreichen und sehr teuren – rund fünfzig Millionen Euro kostenden – Prüfungen künftig noch besser organisiert und durchgeführt werden können.

Die meisten der jetzt in die erste oder zweite Prüfungsphase gehenden Impfstoffkandidaten sind so konzipiert, dass sie eine starke zelluläre Immunabwehr gegen virusinfizierte Zellen stimulieren sollen. Man kann dies erreichen durch die Injektion von nackter DNA, die für ein oder mehrere HIV-Proteine codiert, oder durch Einschleusen von HIV-Genen in virale oder bakterielle Vehikel, die für sich genommen harmlos sind. Geeignete Träger für solche Fremdgene sind zum Beispiel abgeschwächte Stämme von Pockenviren, Adenoviren, Alphaviren oder Salmonellen.

Man kann solche „genetischen Vakzine“ auch kombinieren und in zeitlichem Abstand geben. In Versuchen mit Affen wurden mit ihnen relativ ermutigende Erfolge erzielt. Wie alle im medizinischen Alltag eingesetzten Impfstoffe ►

Eine Impfstrategie gegen Aids

Um das Immunsystem in die Lage zu versetzen, HIV-infizierte Zellen anhand eines Proteins aus dem Kernbereich des Aids-Erregers zu erkennen und anzugreifen, hat die US-Firma Merck eine Zweifachimpfung entwickelt: Der zuerst verabreichte Impfstoff enthält nackte DNA, der zweite, der einige Monate später injiziert wird, genetisch veränderte Adenoviren.



haben diese genetischen Vakzine zwar nicht gegen eine nachfolgende HIV-Infektion geschützt; sie konnten aber im geimpften und später experimentell infizierten Tier die Virusvermehrung quantitativ drastisch reduzieren und im Beobachtungszeitraum von bis zu mehreren Jahren den Ausbruch der Krankheit entweder völlig verhindern oder stark verzögern. Ein Impfstoff der ersten Generation, der den Krankheitsausbruch zumindest verzögert und zugleich die Übertragung von HIV vom Geimpften auf andere Menschen deutlich reduziert, wäre ein signifikanter Fortschritt im Kampf gegen Aids.

Dennoch wissen wir zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht, ob die jetzt zur Prüfung vorgesehenen Impfstoffe einen Menschen wirksam schützen können. Unser gegenwärtiger Wissensstand und die verfügbaren Technologien geben uns dafür keine Gewähr.

Andererseits gibt es Hinweise auf Resistenz gegen die HIV-Infektion im Menschen unter bestimmten natürlichen Bedingungen. So ist seit einigen Jahren bekannt, dass einige Prostituierte in Afrika, die fast täglich in sexuellen Kontakt mit HIV-Infizierten kommen, trotz des hohen Übertragungsrisikos bisher selbst nicht infiziert wurden. Wüssten wir mehr über die Art des Schutzes, ob er überhaupt immunologischer Natur ist oder auf einer genetischen Resistenz basiert, könnten wir möglicherweise die Komponenten des Immunschutzes im Detail definieren. Dann ließen sich auch experimentelle Impfstoffe konzipieren, die insbesondere diese Art des Immunschutzes im Geimpften induzieren. Deshalb ist es so wichtig, dass ausreichende finanzielle und personelle Ressourcen zur Verfügung stehen, damit unser Wissen und die verfügbaren Technologien, die wir für die Entwicklung künftiger experimenteller Impfstoffe brauchen, verbessert werden können.

Angesichts der riesigen Unterschiede bei der Forschungsförderung auf diesem Gebiet wäre es illusorisch zu erwarten, dass Europa im Wettbewerb mit den USA mithalten kann. Gleichwohl zeigt die jüngste Vergangenheit, dass viele Forschungsgruppen in Deutschland und Europa, die auch oft vernetzt arbeiten, wichtige Teilbereiche in der Erforschung eines Impfstoffs gegen Aids erfolgreich abdecken können. ■

Prof. Dr. Reinhard Kurth *ist Präsident des Robert-Koch-Instituts in Berlin.*

GRAVITATIONSWELLEN

Großlabor mit Plumpsklo

Das neue Großexperiment Geo 600, wenngleich äußerst spartanisch angelegt, erlaubt deutschen und britischen Wissenschaftlern den Anschluss an die internationale Spitzenforschung in der Gravitationsphysik.

Von Uwe Reichert

Außen pfui, innen hui – das ist der spontane Eindruck, der sich Besuchern des neuesten deutschen physikalischen Großexperiments nahe des Dorfes Ruthe bei Hannover aufdrängt. Wer nicht die fünfzehn Minuten Fußweg von der nächstgelegenen Bushaltestelle auf sich nehmen will, ist gut beraten, mit dem Auto anzureisen. An der Obstbau-Baumschule der Universität Hannover vorbei zweigt man an einer unscheinbaren Hütte nach links ab Richtung Hauptgebäude. Apfelbäume zur Linken, Acker zur Rechten, führt der Weg 600 Meter geradeaus. Zunächst fällt nur eine Wellblechabdeckung auf, die sich rechts angrenzend an dem Wirtschaftsweg entlangzieht. Weg und Abdeckung enden schließlich an einem Containergebäude, das den Charme einer großen Bauhütte ausstrahlt. Zwei kleinere Baracken und – etwas abseits neben einem Fernmeldemast gelegen – zwei Toilettenhäuschen Marke Toi-Toi vervollständigen das Bild.

Na prima, denkt der unbefangene Besucher, die Baustelle ist schon eingerichtet, wann wird das Forschungszentrum fertig sein? Die Überraschung folgt, wenn man die größte der drei Baracken betritt. Nach einer simplen Schleuse – bitte Straßenschuhe gegen die bereitgestellten Pantoffeln tauschen und die Laserschutzbrille aufsetzen – gelangt man in einen großen Raum, der unverkennbar ein physikalisches Labor enthält.

Der Container, so sieht man jetzt, ist über einer Grube errichtet, in der einige zylindrische Vakuumtanks auffallen, die mit dicken Röhren verbunden sind. Von einem der Tanks führen zwei wuchtige Rohre durch die Wand des Containers nach außen – eines nach rechts und das andere durch die dem Eingang gegenüberliegende Wand. Auf einer Plattform in der hinteren rechten Ecke des Raumes stehen mehrere Computer und Schränke mit Anzeige- und Bedienungselementen, an denen sich zwei Mitarbeiter – ebenfalls mit Laserschutzbrille ausgestattet – zu schaffen machen.

Willkommen im Hauptgebäude! Sie sehen Geo 600, den Gravitationswellendetektor, ein physikalisches Großexperiment ersten Ranges, das der Wissenschaft ein völlig neues Blickfenster in den Kosmos öffnen soll!

In der Tat: Was sich hier im Inneren der provisorisch anmutenden Baracken verbirgt, ist Hightech vom Feinsten. Geo 600 ist ein hochmodernes Laserinterferometer zur Messung kleinster Längenänderungen. Ein Laserstrahl mit einer Wellenlänge von 1064 Nanometern – also im Infraroten und für das menschliche Auge nicht sichtbar – wird zunächst durch einen halbdurchlässigen Spiegel geteilt. Die beiden Teilstrahlen durchlaufen die senkrecht zueinander stehenden, jeweils 600 Meter langen Messstrecken, die in Gräben entlang der Wirtschaftswege führen, werden an deren Enden reflektiert, treffen im halbdurchlässigen Spiegel wieder aufeinander und erreichen dann einen Fotodetektor. Weil sich die wiedervereinigten Strahlen überlagern, entsteht auf dem Detektor ein Interferenzmuster: Dort, wo die Wellen im Gegentakt schwingen, löschen sie sich aus, und es bleibt dunkel. Schwingen sie im Gleichtakt, verstärken sie sich, und die Helligkeit ist maximal.

Das Zittern der Raumzeit

Im Prinzip stehen solche Laserinterferometer in vielen physikalischen Labors der Welt. Was aber Geo 600 von diesen Laborgeräten unterscheidet, ist neben der viel größeren Dimension die enorme Messgenauigkeit. Und die ist kein Selbstzweck, sondern wissenschaftliche Notwendigkeit. Denn die Forscher, die Geo 600 betreiben, sind auf der Suche nach etwas, was noch kein Mensch jemals direkt gemessen oder registriert hat: Gravitationswellen. Jedes Mal, wenn irgendwo im Kosmos Massen von der Größenordnung von Sternen kollidieren, beschleunigt werden oder gar explodieren, ▶

sollte dies kurzfristig das Raum-Zeit-Gefüge stören, wie bereits der Physiker Albert Einstein vor rund neunzig Jahren erkannte. Dieses Zittern der Raumzeit würde sich dann, so die Theorie, mit Lichtgeschwindigkeit nach allen Seiten ausbreiten und den Raum abwechselnd dehnen und stauchen. Ähnlich wie bei seismischen Wellen, die das Erdinnere durchlaufen, würden sich dabei die Abstände benachbarter Materieteilchen periodisch ändern.

Sollte eine Gravitationswelle Geo 600 passieren, dann müsste sich für den Bruchteil einer Sekunde die Länge der beiden Interferometerarme relativ zueinander verändern – allerdings nur um etwa ein Tausendstel des Durchmessers eines Protons. Um diese winzige Längenänderung im Interferenzmuster zu erkennen, ist nicht nur eine außergewöhnliche Präzision in der Durchführung des Experiments vonnöten. Die Anlage muss auch nach allen Regeln der Kunst von äußeren Störungen wie seismischer Unruhe, künstlichen Bodenerschütterungen und Schwankungen der Temperatur und des Luftdrucks entkoppelt werden.



Müssen Forscher Asketen sein?

Wer Geo 600 sieht, begreift, dass fast jeder Euro des Budgets in die wissenschaftliche Apparatur geflossen ist. Das hat einen guten Grund. Die Pläne für einen Gravitationswellendetektor dieser Art gehen auf Ende der 80er Jahre zurück. Doch bedingt durch die deutsche Wiedervereinigung war die Finanzierung von Großforschungsexperimenten so gut wie unmöglich. Die 150 Millionen Mark, die diese Anlage hätte kosten sollen, standen nicht zur Verfügung. Die Wissenschaftler gaben jedoch nicht auf; sie machten aus der Not eine Tugend. Unter Ausnutzen aller Synergien und unter fast völligem Verzicht auf Infrastruktur konnten sie die Kosten auf ein Zehntel der ursprünglichen Summe drücken. Ohne Einfallsreichtum und Selbstkasteiung würde es Geo 600 heute nicht geben.

Damit ist es der deutschen Forschung nach Jahrzehnten der Vernachlässigung wieder gelungen, in der Gravitationsphysik im internationalen Spitzenfeld mitzuwirken. Geo 600 ist zwar weit kleiner und billiger als die derzeit in Betrieb gehenden beziehungsweise im Bau befindlichen Gravitationswellendetektoren in den USA und in Italien. Wegen der ausgeklügelten Technik ist die Anlage jedoch genauso leistungsfähig (siehe Spektrum der Wissenschaft 12/2000, S. 48). Der Stolz über das Erreichte war den Betreibern von Geo 600 – dem Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut), der Universität Hannover und britischen Wissenschaftlern von den Universitäten Cardiff und Glasgow – auf der Einweihungsfeier Mitte Mai deutlich anzumerken.

Allerdings wirft die Askese der Wissenschaftler auch Fragen auf. War Grundlagenforschung in Deutschland bisher zu teuer? Sind Großexperimente künftig nur zu einem Bruchteil der veranschlagten Kosten möglich? An Technik und wissenschaftlicher Qualität lässt sich nicht noch mehr sparen. Aber gewiss kann die Lösung der Finanzknappheit nicht darin bestehen, dass man Doktoranden die Kaffeemaschine entzieht und sie auf ein Plumpsklo setzt. In dieser Hinsicht kann Geo 600 kein Vorbild für künftige Großexperimente sein. Wissenschaft lebt von und mit Wissenschaftlern. Für das Mitwirken an attraktiven Forschungsprojekten mag mancher Student oder Postdoktorand zahlreiche Entbehrungen in Kauf nehmen. Doch letztlich ist es auch das Umfeld, das Wissenschaft für junge Talente attraktiv macht und ihr ein menschliches Gesicht verleiht. ■

Uwe Reichert *ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.*



MPI FÜR GRAVITATIONSPHYSIK

Hightech unterm Wellblechdach: Äußerlich weist wenig darauf hin, dass Geo 600 ein hochmodernes Großexperiment ist.

NACHGEHAKT

Ist die Spur der Milzbrandbriefe zu eindeutig?

Die Ermittler tun sich angeblich mit dem Ermitteln schwer.

Vergangenen Oktober erkrankten in den USA 22 Menschen an Milzbrand, fünf davon starben. Da diese Krankheit, die von dem Sporen bildenden Bakterium *Bacillus anthracis* ausgelöst wird, bereits zwanzig Jahre lang nicht mehr aufgetreten war, lag der Verdacht eines Anschlags mit Biowaffen nahe. Die Ermittler konnten alsbald die meisten der Fälle mit Briefen in Verbindung bringen, die vorsätzlich mit Anthrax-Sporen verseucht und mit der Post verschickt worden waren. (Vier Opfer, die keine derartigen Briefe erhalten hatten, werden inzwischen der Kreuzkontamination bei der Postsortierung zugeschrieben.)

In der gereizten Stimmung jener Monate beschuldigte man sofort die üblichen Verdächtigen. Die Spekulation darüber, welcher der „Schurkenstaaten" es gewesen sein könnte, zierte wochenlang die Titelseiten der Zeitungen. Allein, ein geeigneter Sündenbock ließ sich nicht finden, und noch vor Jahresende wurde es stiller um den Bioterrorismus. Nicht etwa, weil die wissenschaftliche Analyse der verwendeten Anthrax-Sporen unergiebig gewesen wäre. Im Gegenteil, die Befunde grenzten den Ursprung des in höchst mörderischer Weise optimierten Biomaterials auf vier Labors ein, und nur ein paar Dutzend Personen kamen als Attentäter in Frage.

Das Dumme war nur: Alle vier Labors befinden sich in den USA und arbeiten für die US-Regierung. Während die Weltöffentlichkeit auf Afghanistan blickte, wo die Taliban und die Al-Qaida-Mitglieder als Urheber der Flugzeug-Anschläge in New York und Washington bombardiert wurden, blieb Fort Detrick (Maryland) unbehelligt. Aus dem dortigen Labor für Biowaffenforschung, das die US-Armee für Verteidigungszwecke betreibt, stammen offenbar die von den Bioterroristen benutzten Anthrax-Sporen. Hat man die Geschichte einfach unter den Teppich gekehrt?

George Monbiot, Biologe und als Kolumnist der britischen Tageszeitung *The Guardian* einer der brillantesten Kritiker der herrschenden Verhältnisse (siehe www.monbiot.com), hat nun einen Vorstoß unternommen, diesen Teppich ein wenig zu lüften. Er versucht aufzuzeigen, wie die US-Behörden ihre Untersuchung geschickt an den wahren Schuldigen vorbeisteuerten und ins Leere laufen ließen. Monbiot stützt sich dabei auf die Untersuchungen der Biowaffen-Expertin Barbara Hatch Rosenberg, die ein genaues Täterprofil erstellt hatte. Angesichts der hochspezialisierten Kenntnisse und Techniken, die der Täter besessen haben muss, lässt sich der Kreis der Verdächtigen auf wenige Personen eingrenzen. Mehrere von Rosenberg befragte Mikrobiologen nannten als Hauptverdächtigen sogar dieselbe Person.

All dies teilte Rosenberg dem FBI mit, doch ihre Erkenntnisse wurden ignoriert. Anstatt sich die wenigen in Frage kommenden Personen einzeln vorzunehmen, versuchte die US-Bundespolizei den Eindruck zu erwecken, es könne praktisch jeder beliebige Staatsfeind mit einem Experimentierkasten hinter dem Anschlag stecken. Monbiot beschreibt genüsslich, wie das FBI noch im Januar eine breit gestreute Fahndungsaktion aufzog, mit Millionen an Belohnungsgeldern, hunderttausenden Flugblättern und Tausenden von Briefen (unverseucht, hoffentlich!) an amerikanische Mikrobiologen. Für die Personalakten der vier Labors, die mit dem bei den Anschlägen verwendeten Anthrax-Stamm (inzwischen auf den Namen Florida-Stamm getauft) arbeiteten, interessierten sich die Agenten hingegen nicht.

Mittlerweile ist das Genom des Florida-Stamms vollständig sequenziert (siehe *Science, Bd. 296, S. 1002*). Erste Versuche, mittels genetischer Marker zwischen den verschiedenen Labor-Stämmen zu unterscheiden (die sich alle von dem bereits vorher sequenzierten, in Fort Detrick entwickelten Ames-Stamm ableiten), scheiterten an der zu großen Ähnlichkeit der Varianten. Doch dieses Unterfangen wird den Kreis der Verdächtigen lediglich um den Faktor vier verkleinern. Wenn die glamouröse Bundespolizei den Absender der Briefe nicht finden will, wird sie ihn auch dann nicht finden, wenn statt vier Labors nur noch eines in Frage kommt. Es gibt einen Punkt, schreibt Monbiot, an dem Inkompetenz als Erklärung des Scheiterns nicht mehr ausreicht. Wie wahr.

Michael Groß
www.michaelgross.co.uk

SUCHMASCHINE GOOGLE

„Qualität der Suchergebnisse ist unser höchstes Ziel“

Monika Henzinger, die Leiterin der Forschungsabteilung von Google in Mountain View (Kalifornien), äußert sich zum Erfolgsrezept der beliebtesten Suchmaschine.



Spektrum der Wissenschaft: *Frau Henzinger, wie viele Seiten des World Wide Web erschließt Google heute?*
Monika Henzinger: Wir haben über zwei Milliarden Webseiten in unserer Datenbank. Hinzu kommen 700 Millionen Newsgroup-Beiträge, die weit in die Vergangenheit reichen, und 300 Millionen Bilder.
Spektrum: *Und diese Inhalte haben Sie komplett gespeichert?*
Henzinger: In komprimierter Form, ja.
Spektrum: *Ist das nicht schon das gesamte Web?*
Henzinger: Bei weitem nicht! Eigentlich ist das Web unendlich. Es gibt Datenbanken, die beliebig viele Webseiten auf Anfrage erzeugen können. Natürlich macht es keinen Sinn, die alle in der Suchmaschine zu haben. Wir beschränken uns auf Seiten hoher Qualität.
Spektrum: *Wie wählen Sie die aus?*
Henzinger: Nach dem so genannten PageRank. Das ist eine Note, die wir jeder Seite geben, unabhängig von irgendeiner Anfrage, für die diese Seite relevant sein könnte. Und zwar ist die Qualität einer Seite – oder anders gesagt: die Hochachtung, die sie innerhalb des Web genießt – umso größer, je mehr andere Seiten auf sie verweisen und je höher die Qualität der verweisenden Seite ist. Der PageRank bestimmt auch wesentlich die Reihenfolge, in der Google dem Anfrager die Ergebnisse präsentiert.
Spektrum: *Ist der PageRank manipulierbar, etwa durch ein Zitierkartell?*
Henzinger: Es wird zumindest immer wieder versucht. Zum Beispiel ist „Britney Spears“ ein sehr häufiger Suchbegriff. Deswegen versuchen viele, ihren PageRank hochzutreiben, um unter den Antworten auf „Britney Spears“ auf den vordersten Plätzen zu landen, auch wenn sie bloß Turnschuhe verkaufen.
Spektrum: *Und was tun Sie dagegen?*
Henzinger: Wenn wir offensichtlichen Missbrauch sehen, nehmen wir die entsprechenden Seiten gezielt heraus – im Interesse unserer Benutzer, für die wir die Qualität wahren wollen.
Spektrum: *Gibt es auch andere Maßnahmen als diese Einzelkorrekturen?*
Henzinger: Ja. Aber die diskutieren wir nicht öffentlich, um den „Rüstungswettlauf“ nicht anzuheizen.
Spektrum: *Seit wann gibt es Google?*
Henzinger: Die Firma existiert seit dreieinhalb Jahren. Seit reichlich zwei Jahren sind wir auf dem Markt. Die Kunde von uns hat sich durch Mundpropaganda verbreitet, und inzwischen kommt die Hälfte der Anfragen von außerhalb der USA, zwölf Prozent allein aus dem deutschsprachigen Raum.

Wir beantworten über 150 Millionen Anfragen am Tag, und zwar direkt oder über unsere Partner. Wenn zum Beispiel die Suchmaschine Yahoo ein Stichwort nicht im eigenen Verzeichnis findet, reicht sie die Anfrage an uns weiter und gibt dem Benutzer unsere Antwort.
Spektrum: *Mit welcher Hardware läuft das System?*
Henzinger: Mit über zehntausend PCs, verteilt auf vier Datenzentren. Betriebssystem ist Linux.
Spektrum: *Wie prüfen Sie, ob die aufgeführten Webseiten noch existieren?*
Henzinger: Besonders ereignisreiche Webseiten besuchen wir täglich. Alle 28 Tage aktualisieren wir den Index – das ist die Liste, die zu jedem Wort die Seiten aufführt, auf denen es vorkommt.
Spektrum: *Wie aufwendig ist dieses Indizieren?*
Henzinger: Sehr aufwendig. Etwa eine Woche.
Spektrum: *Wie viele Leute hat die Firma?*
Henzinger: Ungefähr 300. Bisher haben wir unsere Belegschaft in jedem Jahr ungefähr verdoppelt.
Spektrum: *Wie finanziert sich Google?*
Henzinger: Überwiegend durch gewöhnliche Reklame: einzeilige Anzeigen, die nur aus durchlaufendem Text bestehen. Diese Werbung erscheint nur auf solche Fragewörter, die mit dem Produkt in Verbindung stehen; wir nennen das „keyword targeting“. Auch kann jeder online eine Anzeige kaufen. Wenn Sie Ihrer Frau über Google zum Geburtstag gratulieren wollen, können Sie eine Anzeige schalten, die nur auf deren Namen hin erscheint.

Zweitens durch Search Services. Zum Beispiel bezahlt uns Yahoo dafür, dass unsere Ergebnisse auf deren Seite erscheinen. Manche Firmen wollen auf ihrer Webseite eine Suchfunktion einrichten, aber nicht selbst programmieren. Für diese Unternehmen bauen wir dann einen eigenen Index und beantworten damit die Suchanfragen, die an sie gestellt werden. Schließlich verkaufen wir neuerdings unsere Produkte zur firmeninternen Nutzung in Intranets.

Mit diesem Konzept sind wir eine der wenigen neuen Internet-Firmen, die ihr Geld verdienen.
Spektrum: *Gibt es neue Projekte?*
Henzinger: Zum Beispiel Spracheingabe. Der Benutzer spricht seine Frage in ein Mikrofon und bekommt die Antworten auf den Bildschirm, später vielleicht auch gesprochen.

Oder unser News Search. Unsere Maschinen lesen Tageszeitungen und stellen Artikel zum gleichen Thema aus verschiedenen Ländern zusammen. Das ist interessant, weil die Berichterstattung zumeist national gefärbt ist. Ein regelmäßiger Vergleich kann den Horizont erweitern. Klicken Sie unter google.com auf „News and Resources“ und dann „Check out the Google news search“.

Oder User Interfaces. Wie bringt man den Benutzer dazu, mehr als zwei Wörter einzutippen? Je mehr Wörter er ansagt, desto besser können wir ihn bedienen.

Das Interview führte **Christoph Pöppe**, *Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.*

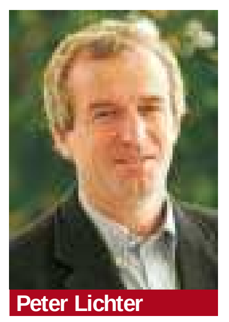
Ohne Suchmaschinen wären in der chaotischen Vielfalt des World Wide Web die relevanten Informationen kaum zu finden. Solche speziellen Programme liefern auf ein Stichwort hin eine Liste von Webseiten, die dazu etwas Bedeutendes zu sagen haben (so die Idealvorstellung) oder in denen das Stichwort irgendwo vorkommt (so die Realität). Binnen kurzem wurde auch in Europa Google (www.google.com oder www.google. de) bekannt und zur meistgefragten Suchmaschine überhaupt. Der Name spielt auf den amerikanischen Spitznamen „googol“ für 10^{100} an.

DEUTSCHER KREBSPREIS

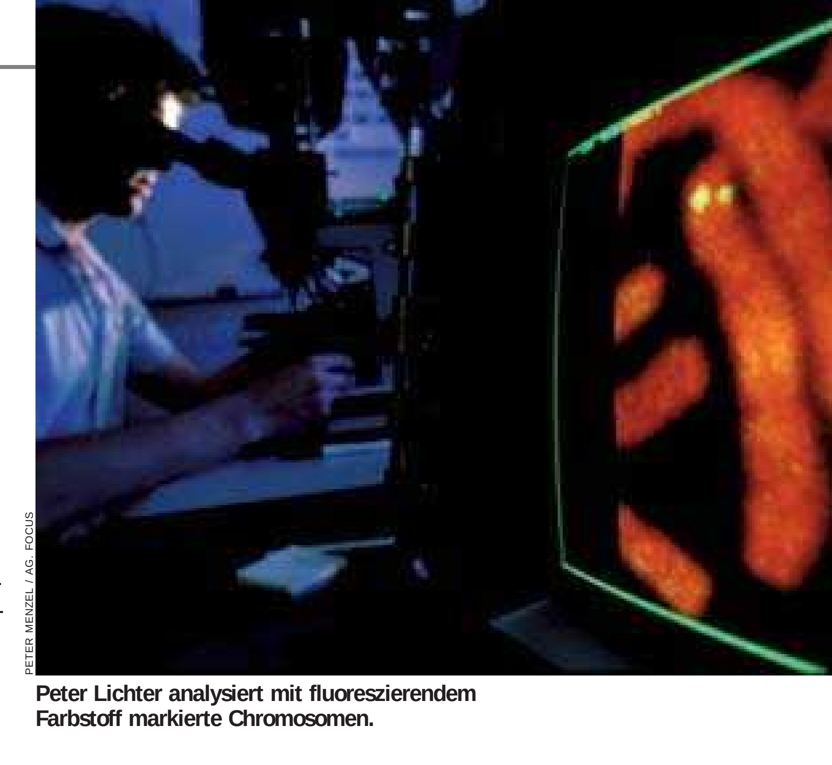
Farbige Fischerei und erzwungener Selbstmord

Diese „Fish and Chips“ gibt es nicht an der Imbissbude, und sie stillen auch nicht den Hunger. Fish (Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung) spürt vielmehr Schäden in Chromosomen auf, indem einzelne Gene in der Zelle mit rotem oder grünem Fluoreszenzfarbstoff markiert werden. Das dabei entstehende Muster der Gendefekte in Krebszellen birgt wichtige Informationen für die Heilungschancen. Die Methode wurde bereits 1988 von dem Team um Peter Lichter, Leiter der Abteilung Molekulare Genetik am Deutschen Krebsforschungszentrum (DKFZ) in Heidelberg, entwickelt und wird heute weltweit in der Tumorforschung eingesetzt. Aus einer Variante des Verfahrens entstanden die Chips, genauer die DNA-Chips, die eingesetzt werden, um Tumorzellen mit gesunden Zellen zu vergleichen. Für diese Arbeiten erhält Lichter den experimentellen Teil des Deutschen Krebspreises 2002.

Der klinische Teil des Preises geht an Klaus-Michael Debatin, Direktor der Universitätskinderklinik und Poliklinik Ulm. Debatin wird für seine Forschungen zum programmierten Zelltod (Apoptose) ausgezeichnet. Debatin entdeckte einen molekularen Schalter an der Zelle, über den diese zum Selbstmord gebracht werden kann. Auch verschiedene Chemotherapeutika, die in der Krebstherapie eingesetzt werden, benutzen diesen Signalweg, um die Tumorzellen zu zerstören. Wird die Übertragung blockiert, entsteht eine Resistenz. Debatin und seine Mitarbeiter haben nun eine neue Substanzgruppe identifiziert, die Tumoren des Nervengewebes zur Apoptose zwingt. Die Forscher hoffen, damit neue Therapieansätze entwickeln zu können, die therapieresistente Krebszellen wieder behandelbar machen.


Peter Lichter


Klaus-M. Debatin


PETER MENZEL / AG. FOCUS

Peter Lichter analysiert mit fluoreszierendem Farbstoff markierte Chromosomen.

Lichter studierte Biologie und promovierte in Heidelberg. Nach einem Forschungsaufenthalt in den USA forscht er seit 1990 am Deutschen Krebsforschungszentrum. Im November 2000 wurde er an der Medizinischen Fakultät der Universität Heidelberg zum Professor ernannt.

Debatin studierte Medizin in Ulm, Freiburg und Heidelberg, wo er 1979 promovierte. Nach mehreren Auslandsaufenthalten und verschiedenen Positionen in Deutschland wurde er 1995 Leiter der Abteilung Molekulare Onkologie/Pädiatrie am DKFZ. Seit 1997 ist der habilitierte Arzt für Kinderheilkunde ärztlicher Direktor der Universitäts-Kinderklinik Ulm.

Der Deutsche Krebspreis wird jährlich zu gleichen Teilen für hervorragende Arbeiten im deutschsprachigen Raum verliehen, die aus der experimentellen Krebsforschung und der Tumordiagnostik und -behandlung stammen, und ist mit insgesamt 15 000 Euro dotiert.

INNOVATIONSPREIS DER VODAFONE-STIFTUNG

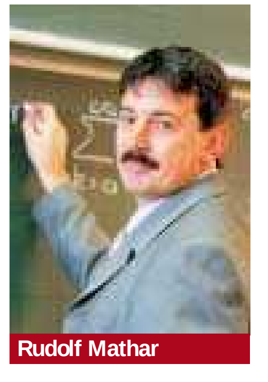
Trickreiches Rechenverfahren

Mit dem Handy ist man nur dann überall erreichbar, wenn die Sendestationen im Mobilfunknetz optimal verteilt sind. Aber selbst die schnellsten Computer sind damit überfordert, die günstigste Platzierung mathematisch exakt zu berechnen.

Rudolf Mathar, Professor am Institut für Statistik und Wirtschaftsmathematik der Rheinisch-Westfälischen Hochschule Aachen, hat in sechsjähriger Forschungsarbeit eine geschickte Methode entwickelt, mit der sich in vertretbarer Rechenzeit eine Lösung finden lässt, die dem Optimum recht nahe kommt. Für diese Forschungen erhielt er nun den Innovationspreis 2002 der Vodafone-Stiftung.

Der Mathematiker Mathar teilt Mobilfunknetze in etliche kleine Teilbereiche auf, für die sich jeweils die günstigsten Standorte der Basisstationen genau berechnen lassen. Anschließend werden die Teilbereiche so überlagert, dass sich eine nahezu optimale Gesamtlösung ergibt.

Mathar arbeitet auch an Rechenverfahren, welche die exakte Ausbreitung von Funkwellen unter Berücksichtigung von Beugungen und Reflexionen an Hindernissen wie etwa Gebäuden ermitteln. Damit lassen sich gegenseitige Störungen benachbarter Sendestationen vorhersagen.


Rudolf Mathar

Mit dem Innovationspreis der Vodafone-Stiftung werden herausragende Arbeiten auf dem Gebiet der Mobilkommunikation ausgezeichnet, die einen klaren Praxisbezug haben und die von Wissenschaftlern bevorzugt aus dem deutschen Sprachraum stammen. Der Preis ist mit 25 000 Euro dotiert und soll den Austausch von Wissenschaftlern untereinander sowie zwischen Wissenschaftlern und Industrie fördern.

Wie der Mensch das Denken lernte – April 2002

Der Autor Ian Tattersall erläutert die Vorzüge des beim modernen Menschen verlängerten Rachenraumes für die Lautmodulation, stellt aber diesem Gewinn einen „Preis“ gegenüber, nämlich, dass nunmehr gleichzeitiges Schlucken und Atmen unmöglich geworden sei – „mit dem fatalen Risiko, beim Essen zu ersticken“.

Dieses Risiko gibt es tatsächlich – man kann bei Bewusstlosigkeit an Erbrochenem ersticken, medizinisch bekannt als Aspiration. Der große Fehler bei Tattersall aber ist, dass dies nicht nur eine Eigenschaft des modernen Menschen darstellt, sondern eine, die allen (!) Säugern gemeinsam ist. Schon der berühmte Zoologe Alfred Sherwood Romer merkte in seiner „Vergleichenden Anatomie der Wirbeltiere“ an, der „Pharynx“ sei bei Säugern „der Ort, wo sich Nahrungs- und Atemweg in nicht ganz glücklicher Weise kreuzen“ und dies ist aus der Evolution des Kiemendarms der Vertebraten heraus ja vollkommen klar.

Storch, Welsch und Wink stellen in ihrem Buch „Evolutionsbiologie“ nach genauer Darstellung der anatomischen Einzelheiten überdies zusammenfassend fest: „Insgesamt ergibt sich bei kritischer Analyse, dass allein aus anatomischen Strukturen des Kehlkopfes und des Ansatzrohres einschließlich der Kiefer nicht mit Sicherheit auf Sprachfähigkeit geschlossen werden kann.“



ALEXANDER MARSHACK

Diese Figur aus Mammut-Elfenbein wurde bereits vor über 32 000 Jahren geschnitzt.

Damit aber wird das „Kosten“-Argument von Tattersall, wonach „die besondere Gestaltung des menschlichen Vokaltraktes zum Ausgleich einen deutlichen anderen Vorteil bieten musste“ schon im Ansatz fragwürdig, weil diesen „Preis“ ja alle höheren Wirbeltiere, bei denen sich Nahrungs- und Luftwege überkreuzen, zahlen müssen. Der „Preis“ ist kein Spezifikum für den mit einem Sprechapparat ausgerüsteten Hominiden!

Hamid Moghareh-Abed, Roßdorf

Die unheimliche Macht der Bilder – Rezensionen, April 2002

Jeglichen Rassismus, einschließlich der antisemitischen Abart, als „spezifisch deutsch“ abzutun, wie Martin Urban das tut (S. 107, 3. Spalte Mitte) ist nicht nur falsch, sondern auch gefährlich, indem es impliziert, dass dieses Kapitel der Menschheitsgeschichte überwunden sei. Die Fokussierung auf die – unbestreitbare – rassistische Geschichte unseres Volkes verstellt den Blick auf Rassismus auf dem Balkan, in den USA, in den Staaten der ehemaligen Sowjetunion, in Afrika und natürlich auch in Palästina. Lassen Sie uns jeden Rassisten einen Rassisten nennen.

Friederich Prinz, Moers

Wettlauf zum elektronischen Papier – Mai 2002

Das Bild zum Beitrag ist zweifellos ein optisch schöner Aufmacher, allerdings passt die Bildunterschrift nicht so ganz: Dort ist zu lesen „Spezielle Mikrochips – zwei liegen hier auf dem Display – ‚setzen‘ den Text.“ So besonders „speziell“ sind 16-MegaBit-Eproms (*Erasable Programmable Read Only Memory*, also ein mit UV-Licht löschbarer und neu programmierbarer Nur-Lese-Speicher) vom Typ M27C160 des Herstellers SGS Thomson (ST) für diese Anwendung nicht, zumal es sich bei den abgebildeten Bausteinen um „Veteranen“ im so genannten DIL-(*Dual-In-Line*)-Gehäuse handelt, das in modernen Geräten normalerweise gar nicht mehr eingesetzt wird, weil es in der Schaltung zu viel Platz verbraucht und sich nicht als SMD (*Surface Mounted Device* – also oberflächenmontiertes Bauteil) verarbeiten lässt. Mit dem Herstellungsdatum 0051 (51. Woche 2000) sind sie auch nicht mehr ganz „taufrisch“. Solche Eproms eignen sich höchstens zum Speichern des Betriebsprogrammes von elektronischem Papier – das „Setzen“ übernimmt ein deutlich aufwendigerer Mikroprozessor mit zusätzlicher Peripherie.

Wolf-D. Barth, Reutlingen

Wenn Fernsehen zur Droge wird – Mai 2002

Ein interessanter Artikel, in den sich leider ein immer wieder auftauchender Fehler eingeschlichen hat: Bei der 1997 ausgestrahlten Sendung des japanischen Fernsehens handelte es sich nicht um das Pokémon-Videospiel, sondern um die gleichnamige Zeichentrickserie (japanisch „Animé“). Während bei Animés farbige blitzende oder mit flimmernden Mustern versehene Hintergründe bei mehr oder weniger statischen Vordergründen durchaus Genre-prägend sind, ist dies bei Computer- und Videospielen äußerst selten der Fall. Meist sind dort die Hintergründe sogar statisch und werden nur in Zwischensequenzen animiert, auch schnelle Schnitte sind bei Videospielen eher untypisch.

Igor Clukas, Dießen

Wenn die Netzhaut verfällt
April 2002

Lehrbuchirrtum

Ein klassischer Lehrbuchirrtum hat sich eingeschlichen: Die Stäbchen der Netzhaut „liegen“ nicht (wie berichtet) „überwiegend im Randbereich der Netzhaut“, sondern weisen eine ausgeprägte Zunahme der Zelldichte zum Netzhautzentrum hin auf. Das Maximum befindet sich nur 5 – 7 mm von der Foveola (Gesamtstrecke bis zur Peripherie 20 – 25 mm) entfernt. Erst dann fällt die Stäbchendichte zu Gunsten der höheren Zapfendichte ab. Wäre es so wie in Ihrem Artikel beschrieben, könnten wir uns nur schwerlich in der Dunkelheit orientieren. Unglücklich ist es auch, Lipofuszinablagerungen in den retinalen Pigmentepithelzellen als „Schlackstoffe“ zu bezeichnen, da dieser Terminus in unheilvoller Weise paramedizinisch missbraucht wird.

Prof. H. Gerding, Münster

Fehlender Blick

Es wäre sehr schön gewesen, wenn Sie vor Andruck dieses Artikels auch einmal einen Augenarzt einen Blick darauf hätten werfen lassen. Dann wäre die Darstellung des unscharfen „L’s“ auf Seite 49 etwas wirklichkeitsgetreuer ausgefallen und vor allem wäre nicht in dem Bild auf Seite 54 die Lederhaut als Hornhaut bezeichnet worden. Grober Fehler in der ansonsten sehr schönen Darstellung der diagnostischen und therapeutischen Probleme.

Dr. Tilo Gutzeit, Berlin

Teilen und Helfen – Ursprünge sozialen Verhaltens
März 2002

Moralisch oder mit Ellbogen handeln

Moralisches Denken ist und bleibt ein Produkt der menschlichen Erziehungsarbeit. Trotzdem wird das ignoriert, um Geld und Macht zu erlangen. Unsere Weltwirtschaft bietet genügend Anonymität, sodass der soziale Druck aufgehoben ist und dadurch der angeborene Egoismus für unser häufiges „Ellbogen-Denken“ sorgt. Zu Hause, mit Freunden und in der Öffentlichkeit sind die gleichen Leute hilfsbereit, großzügig mit ihrem Hab und Gut, und glücklich dabei, anderen etwas Gutes zu tun – doch nie, ohne dabei ihren Namen zu nennen!

Die sozialgesellschaftliche Entwicklung, der der *Homo sapiens* seinen evolutionären Erfolg verdankt, ist im Zuge der Globalisierung hoffentlich nicht am Ende angelangt.

Max Happel, Karben

Triebfeder Missgunst

Missgunst wird nicht gerne als Motiv angenommen, das gilt als reichlich primitiv, ist aber eine mächtige Triebfeder. Und mit dieser Missgunst rechnen auch die meisten Ultimatum-Spieler und bieten daher die 50:50-Aufteilung an.

In diesem Wechselspiel von Fairness und Missgunst bewegen wir uns meistens ausgewogen, aber stellenweise lässt sich doch die Missgunst pur besichtigen. Bei der Diskussion um die doppelte Staatsbürgerschaft haben es deutsche Jugendliche am klarsten ausgesprochen: Sie vermuteten bei den so genannten Doppelpass-Inhabern Vorteile, die sie selbst nie bekommen könnten, z. B. die Möglichkeit zum Ausweichen in einen anderen Staat bei Problemen. Nur gut, dass wir gesellschaftliche Regeln zur Kooperation haben, aber die müssen erlernt werden. Da fand ich die Darlegungen sehr überzeugend.

Elisabeth Kramer, Weinheim

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 91 26-729

Der Engpass – März 2002



DAVE CUTLER

Die rasch wachsende Bevölkerung wird zur Belastungsprobe für die Erde.

Früher Hungersnöte – heute Flächenstilllegung

Der Autor Edward Wilson wärmt in seinem Beitrag die alten Thesen und Methoden der „Club of Rome“-Studie von 1972 wieder auf. Dennis Meadows prognostizierte seinerzeit in „Grenzen des Wachstums“ für den Jahrtausendwechsel weltweite Hungersnöte, versiegende Ressourcen, Umweltzerstörung und den Zusammenbruch der Weltwirtschaft. Wilson schiebt den Weltuntergang nun einfach hundert Jahre weiter nach hinten. Dadurch werden aber die bisher schon falschen Prognosen nicht richtiger. Die Methode der statistischen Trendfortschreibung – etwa bei der Nahrungsmittelproduktion und der dafür verfügbaren bzw. benötigten Fläche – führt regelmäßig in die Irre.

Angesichts der von Wilson beschworenen Gefahren der „Bevölkerungsexplosion“ stellt sich mir die Frage, warum vor 300 Jahren ein paar wenige Europäer regelmäßig von schweren Hungersnöten heimgesucht wurden, während heute rund 700 Millionen Menschen in Europa sich Gedanken darüber machen, welche Prämien man den Bauern für die Stilllegung welcher Produktionsflächen zahlt. Ist eine solche Entwicklung für das von Wilson immer wieder beschworene Beispiel China denn auszuschließen? Wilsons Äußerung, das menschliche Bevölkerungswachstum im 20. Jhd. „entsprach eher der Vermehrung von Bakterien als von Primaten“ empfinde ich als menschenverachtend.

Dr. J. Stech, Meckenheim

Unfallfreies Fahren – Netze in Fahrt
Mai 2002

Es gibt kein Patt an der Kreuzung! Das violette Fahrzeug hat Vorfahrt. Es befindet sich auf der durch das gelbe Viereck gekennzeichneten Vorfahrtstraße. Die beiden anderen sind wartepflichtig. Und selbst wenn keinerlei Verkehrszeichen oder Fahrbahnmarkierungen vorhanden wären, gäbe es kein Patt. Dann wäre das rote Fahrzeug berechtigt, zuerst zu fahren, denn bei ihm kommt niemand von rechts (Rechts-vor-links-Regel).

Dr. habil. A. Zienert, Heidelberg

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle, Christina Peiberg
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Andreas Merkert, Natalie Schäfer (stv. Herstellerin)
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg Tel. (0 62 21) 91 26-711, Fax (0 62 21) 91 26-729
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 3357, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (0 62 21) 91 26-770
Herstellung: Klaus Mohr, Tel. (0 62 21) 91 26-730
Marketing und Vertrieb: Annette Baumbusch, Anke Walter, Tel. (0 62 21) 91 26-741/744; E-Mail: marketing@spektrum.com
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Ulf Borgeest, Dr. Bernhard Epping, Dr. Werner Gans, Dr. Udo Gansloßer, Dr.Walter Massing, Peter Schütz.
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 91 26-600, Fax (0 62 21) 91 26-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser-Service: Marianne Blume, Tel. (0 62 21) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Holger Grossmann, Tel. (02 11) 887-23 79, Fax (02 11) 887-23 99 verantwortlich für Anzeigen: Stefan Söht, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-23 86, Fax (02 11) 887-28 46
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 94, Fax (0 40) 33 90 90; Düsseldorf: Cornelia Koch, Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 3 01 35-20 50, Fax (02 11) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16-18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82, Fax (0 69) 92 01 92 88; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 8 87-23 87, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 23 ab 01.01.2002.
Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D-69214 Eppelheim

ISSN 0170-2971
Ein Teil unserer Auflage enthält eine Beilagen von Rothacker, Martinsried. Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

MEDIZIN

Freispruch für den Fadenwurm

Bakterien verursachen Flussblindheit

Bislang galt die in Afrika und Südamerika grassierende Flussblindheit als Wurmerkrankung. Neue Untersuchungen zeigen jetzt aber, dass nicht die Würmer selbst, sondern in ihnen lebende Bakterien die schlimmsten Symptome verursachen.

Von Petra Jacoby

In ihren tropischen Verbreitungsgebieten ist die Flussblindheit oder Onchozerkose ein großes gesundheitliches und soziales Problem. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat daher in Afrika seit 1974 und in Südamerika seit 1992 Programme zur Bekämpfung dieser Seuche eingerichtet. Trotz vieler Erfolge leiden aber immer noch 18 Millionen Menschen an der Krankheit. 350 000 Patienten sind bereits erblindet, und bei weiteren 500 000 ist die Sehkraft stark eingeschränkt.

Die Ansteckung erfolgt durch Stiche von Kriebelmücken der Gattung *Simulium*. Dabei gelangen mikroskopisch kleine Larven der Knäuelfilarie *Onchocerca volvulus*, die zu den Fadenwürmern gehört, in das Bindegewebe der Unterhaut. Dort reifen sie zu den erwachsenen Würmern heran. Die bis zu einem halben Meter langen Weibchen leben mit mehreren nur rund vier Zentimeter großen Männchen zusammen in linsengroßen abgekapselten Knoten und bringen ständig neue Larven hervor (Bild unten).

Diese so genannten Mikrofilarien sind die eigentlichen Übeltäter. Sie wandern durch das Unterhautbindegewebe und dringen dabei oft auch in die Augen vor. Ein Teil von ihnen wird wieder von Kriebelmücken beim Blutsaugen aufgenommen und damit weiter übertragen.

Die meisten Larven sterben nach einiger Zeit ab. Doch das macht sie nicht etwa unschädlich – im Gegenteil: Erst ihr Tod löst die schlimmsten Krankheitssymptome aus. Es kommt zu heftigen Immunreaktionen, die einen quälenden Juckreiz am ganzen Körper hervorrufen. Sind die Augen befallen, entzündet sich die Hornhaut. Mit der Zeit trübt sie sich dadurch ein, und der Patient erblindet schließlich.

Bisher war man der nahe liegenden Ansicht, dass sich die schädlichen Abwehrreaktionen gegen wurmeigene Stoffe aus den abgestorbenen Mikrofilarien richten. Neue Forschungsergebnisse widerlegen diese Vermutung nun jedoch. Sie stammen von einem Team um Eric Pearlman von der Case Western Reserve University in Cleveland (Ohio) sowie von Wissenschaftlern aus England und Deutschland. Danach sind die eigentlichen Schuldigen anscheinend Bakterien der Gattung *Wolbachia*, die in den Knäuelfilarien leben. Wenn sie aus toten Larven frei werden, lösen sie die zerstörerischen Entzündungsprozesse aus (*Science, Bd. 295, S. 1892*).

Derartige Bakterien kommen nicht nur in *O. volvulus*, sondern in fast allen Filarien-Arten vor. Sie sind aus bislang unbekannten Gründen für die Fortpflanzung der Würmer unentbehrlich. Vom Typ her ähneln sie Rickettsien: durch Insekten übertragenen Bakterien, die im Innern von Zellen parasitieren und unter anderem das Fleckfieber verursachen.

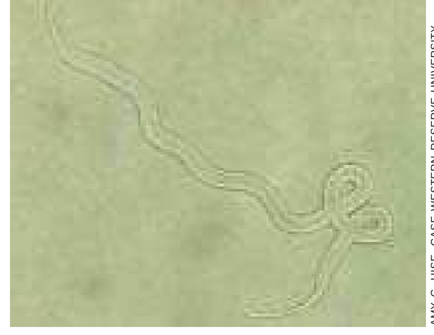
Um zu prüfen, ob *Wolbachia* an der blind machenden Entzündung bei Onchozerkose-Kranken beteiligt ist, injizierten Pearlman und seine Kollegen Extrakte von Knäuelfilarien mit und ohne Bakterien direkt in die Hornhaut von Mäusen. Die keimfreien Lösungen gewannen sie aus Würmern, denen sie vorher mehrere Wochen lang ein Tetracyclin-Antibiotikum verabreicht hatten, das gegen Rickettsien wirksam ist.

Die Ergebnisse des mikroskopischen Vergleichs waren eindeutig. Wurm-Extrakte mit Bakterien riefen eine wesentlich stärkere Schwellung und Trübung der Hornhaut hervor als bakterienfreie Lösungen. Außerdem wanderten vermehrt bestimmte Blutzellen (neutrophile Granulocyten) ein, die sich speziell an Entzündungsherden sammeln.



WHO / TDR / OCP

Auslöser der Flussblindheit ist die Knäuelfilarie *Onchocerca volvulus*. Bis zu einen halben Meter lange Weibchen leben in linsengroßen Knoten im Unterhautgewebe mit mehreren nur rund vier Zentimeter großen Männchen zusammen (links) und produzieren unablässig mikroskopisch kleine Larven. Diese Mikrofilarien (unten) können bei der Wanderung durch den Körper ins Auge gelangen. Wenn sie dort absterben, verursachen sie Entzündungen und eine Trübung der Hornhaut.



AMY G. HISE, CASE WESTERN RESERVE UNIVERSITY

Auch auf molekularer Ebene konnten die Wissenschaftler nachweisen, dass *Wolbachia*-Bakterien das Abwehrsystem alarmieren. So stellten sie fest, dass nach der Injektion von Wurm-Extrakten, die mit den Mikroben belastet waren, die Gene mehrerer Entzündungsfaktoren verstärkt abgelesen wurden. Offenbar aktivieren die Bakterien Rezeptoren auf der Oberfläche von Hornhautzellen und schalten dadurch Signalsysteme des Immunsystems an.


WHO / TDR / CRUMP

Eine Prozession von Menschen, die durch Onchozerkose erblindet sind, verlässt eine Gemeindeversammlung in Nigeria. Die Aufnahme stammt aus dem Jahr 1998.

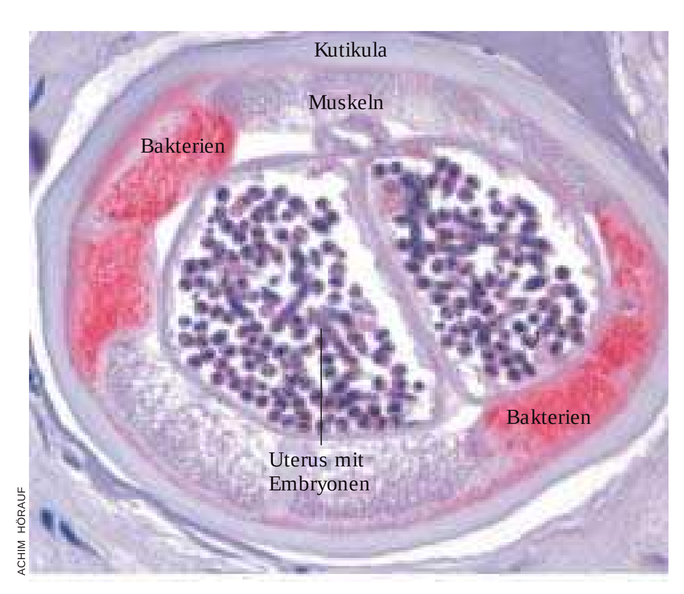
Antibiotika machen Parasiten unfruchtbar

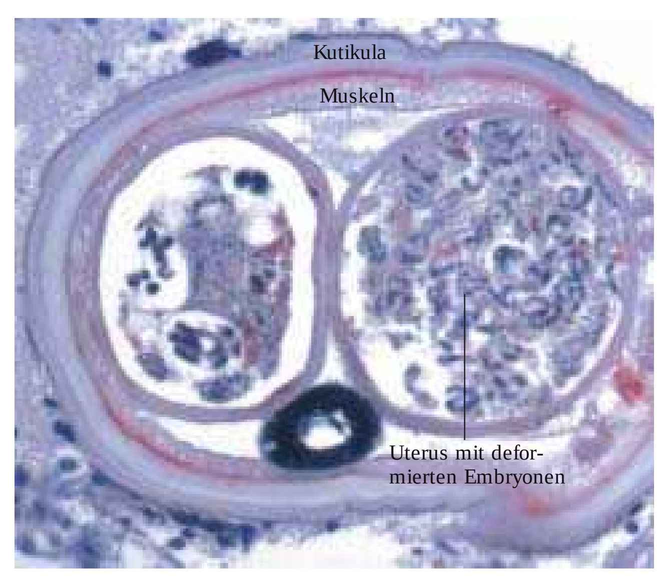
Dieses Ergebnis hat große Bedeutung für die klinische Praxis; denn es impliziert einen neuartigen, auf Antibiotika basierenden Therapieansatz gegen Flussblindheit. Bei der herkömmlichen Behandlungsmethode nehmen Betroffene einmal jährlich das Wurmmittel Ivermectin ein. Es tötet allerdings nur Mikrofilarien ab, während die erwachsenen Würmer bis zu fünfzehn Jahre am Leben bleiben und sich weiter vermehren. Die Therapie mit Ivermectin kann daher zwar in vielen Fällen verhindern, dass Mikrofilarien lange genug leben, um bis in die Augen vorzudringen und eine Erblindung zu verursachen. Gänzlich ausrotten lässt sich die Onchozerkose auf diese Weise jedoch nicht, da in den Infizierten weiterhin Larven nachwachsen, die dann per Mückenstich auf andere Menschen übertragen werden.

Deshalb wurde schon vor den überraschenden neuen Ergebnissen eine Antibiotika-Behandlung vorgeschlagen, die sich gegen die *Wolbachia*-Bakterien in den Würmern richtet. Sie macht die Knäuelfilarien nämlich langfristig unfruchtbar, indem sie sie ihrer Vermehrungshelfer beraubt. Das konnten Achim Hörauf und seine Kollegen vom Bernhard-Nocht-Institut für Tropenmedizin in Hamburg schon vor zwei Jahren in Studien mit Freiwilligen aus Ghana nachweisen (*Lancet, Bd. 355, S. 1242*).

Die Hornhaut-Tests an Mäusen zeigen nun, dass die Antibiotika-Therapie sogar noch viel direkter gegen Onchozerkose wirken sollte, indem sie nicht nur die Würmer sterilisiert, sondern mit den *Wolbachia*-Bakterien auch die eigentlichen Verursacher der überschießenden Immunreaktion abtötet. Allerdings bleibt abzuwarten, ob sich eine derartige Behandlung überhaupt großflächig in den betroffenen Regionen durchführen lässt. Schließlich spielen im Gesundheitswesen von Entwicklungsländern leider immer auch finanzielle und strukturelle Aspekte eine wesentliche Rolle. ■

Petra Jacoby *ist Diplom-Biologin und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Wittlich.*





Auf dem Querschnitt eines unbehandelten *Onchocerca*-Weibchens (links) erkennt man zahlreiche, rot angefärbte Bakterien unterhalb der Kutikula („Außenhaut") sowie heranwachsende intakte Mikrofilarien im Uterus. In einem Weibchen, das zehn Monate nach einer Antibiotika-Behandlung aus dem Körper entfernt wurde (rechts), finden sich keine Bakterien mehr, und die Embryonen sind degeneriert, weil der Fadenwurm aus noch unbekannten Gründen die Mikroben zur Vermehrung benötigt.

RELATIVITÄTSTHEORIE

Einstein auf dem Prüfstand

Mit einem neuen Experiment ließ sich der Grundpfeiler der Speziellen Relativitätstheorie – die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit – noch genauer bestätigen. Einige Quantengravitations-Modelle fordern kleine Abweichungen von dieser Konstanz.

Von Oliver Morsch

Vertrauen ist gut, Kontrolle ist besser – nicht nur im täglichen Leben fährt man mit dieser Weisheit meist gut, sondern auch in der Wissenschaft. Immer wieder war in der Geschichte der Physik ein gesundes Misstrauen gegenüber Mess-Ergebnissen Ausgangspunkt für bahnbrechende Entdeckungen. Auch in etablierten Zweigen der exakten Naturwissenschaften kann es sich durchaus lohnen, die Genauigkeit von Messungen so weit wie möglich zu verbessern, um physikalische Vorstellungen immer strengeren Tests zu unterziehen. Ein Team von Physikern der Universitäten in Konstanz und Düsseldorf hat dies nun mit einer der prominentesten Theorien überhaupt getan: Albert Einsteins Spezieller Relativitätstheorie.

Deren Grundlage bildete ein Experiment aus dem Jahre 1887, mit dem nachgeprüft werden sollte, wie sich die Erde relativ zum „Äther" bewegt. In diesem ungreifbaren Stoff sahen damals viele Physiker das Medium, in dem sich elektromagnetische Wellen ausbreiten. Die Bewegung der Erde relativ zu ihm sollte dazu führen, dass sich Licht in verschiedenen Richtungen unterschiedlich schnell fortpflanzt. Albert Michelson und Edward Morley suchten mit einem speziell konstruierten Apparat nach diesem Geschwindigkeitsunterschied und fanden – nichts: Das Licht bewegte sich in allen Richtungen gleich schnell.

Dieses sensationelle Null-Resultat löste sofort heftigste Diskussionen in der Welt der Physiker aus, bis Einstein 1905 mit seiner Speziellen Relativitätstheorie die althergebrachten Vorstellungen seiner Kollegen von Raum und Zeit schließlich komplett über den Haufen warf. Der Äther wurde als Konzept abgeschafft, und oberstes Prinzip war von nun an, dass sich physikalische Gesetze unabhängig von der (unbeschleunigten) Bewegung eines Beobachters immer auf gleiche Art und Weise beschreiben lassen.

Insbesondere deklarierte Einstein die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum als fundamentale Naturkonstante, die immer und überall denselben Wert hat. Ein Lokführer, der mit hundert Kilometern pro Stunde einem Signal entgegenfährt, wird daher dieselbe Geschwindigkeit des Signallichts messen wie ein auf dem Bahnsteig wartender Passagier; dafür ticken die Uhren im Zug einen Tick langsamer. Mit einigen einfachen mathematischen Gleichungen, die der niederländische Physiker Hendrik Antoon Lorentz schon vor Einstein abgeleitet hatte, lässt sich ausrechnen, welches Resultat ein beliebiges physikalisches Experiment an Bord der Lokomotive aus Sicht des Passagiers auf dem Bahnsteig liefert.

Die Eleganz der Speziellen Relativitätstheorie verhalf ihr sehr schnell zum Durchbruch. Bis heute ist aber auch kein Faktum aufgetaucht, das im Widerspruch zu ihr steht. Im Gegenteil: In der Teilchenphysik wird sie ständig ganz selbstverständlich mit großem Erfolg angewendet. Doch so etabliert und wohlerprobt eine Theorie auch ist – wie genau sie die Natur beschreibt und ob oder wo sie möglicherweise an Grenzen stößt, können letztlich nur Experimente entscheiden. Der Michelson-Morley-Versuch ist inzwischen mehrmals wiederholt und verfeinert worden. Heutzutage können sich die Physiker daher sicher sein, dass die Lichtgeschwindigkeit auf der Erde allerhöchstens um ein millionstel Prozent mit der Richtung variiert.

Kosmisches Karussell

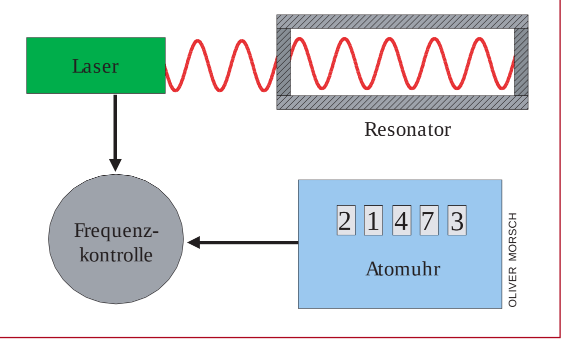
Experimentell nicht so gut abgesichert ist dagegen eine allgemeinere Aussage von Einsteins Theorie. Danach soll die Lichtgeschwindigkeit generell unabhängig davon sein, wie schnell sich ein Testlabor relativ zu einem als ruhend gedachten Bezugssystem bewegt. Als solches könnte etwa der Fixsternhimmel oder präziser: der kosmische Mikrowellen-Hintergrund fungieren, durch den das Sonnensystem mit fast 340 Kilometern pro Sekunde rast. Da die Erde selbst mit 30 Kilometern pro Sekunde um die Sonne kreist, ändert sich ihre Geschwindigkeit relativ zum Mikrowellen-Hintergrund im Laufe eines Jahres um 60 Kilometer pro Sekunde oder knapp 18 Prozent (Bild auf Seite 14).

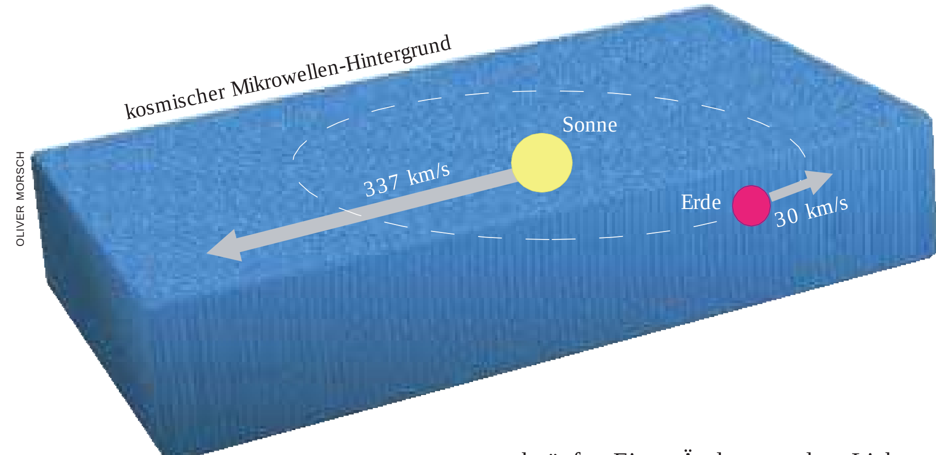
Variiert parallel dazu auch die Lichtgeschwindigkeit, die in einem Labor auf der Erde gemessen wird? Bisher konnten Physiker experimentell nur zeigen, dass eventuelle Schwankungen weniger als ein hundertstel Prozent betragen. Entsprechende Messungen, die auch als Kennedy-Thorndike-Experimente bezeichnet werden, waren demnach zehntausendmal ungenauer als die nach Michelson und Morley.

Um die Gültigkeit der speziellen Relativitätstheorie auch für diesen Fall gründlicher zu überprüfen, haben Achim Peters aus Konstanz und seine Kollegen deshalb jetzt eine Apparatur entwickelt, die deutlich präzisere Ergebnisse erlaubt (Kasten links). Das Kernstück ist ein Resonator aus Saphir, dessen Länge durch Abkühlen auf – 269 Grad Celsius extrem stabil gehalten wurde. In ihn koppelten

Test auf die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Kernstück des Experiments war ein auf –269 Grad Celsius gekühlter Resonator mit einer stehenden Lichtwelle, die von einem Laser erzeugt wurde. Ihre Wellenlänge kann nur solche Werte annehmen, die Teiler der Resonatorlänge sind. Der Laser sendet automatisch Licht der entsprechenden Frequenz aus. Sie hängt bei konstanter Resonatorlänge ausschließlich von der Lichtgeschwindigkeit ab. Die Kontrolle der Laserfrequenz mit einer Atomuhr ergab nun, dass sich die Wellenlänge der stehenden Lichtwelle im Resonator und damit die Lichtgeschwindigkeit im Laufe eines Jahres nicht ändert, obwohl die Geschwindigkeit der Erde relativ zum kosmischen Hintergrund stark variiert.





Während die Erde um die Sonne rotiert, ändert sich ihre Geschwindigkeit relativ zum kosmischen Mikrowellen-Hintergrund im Jahresrhythmus um 60 Kilometer pro Sekunde. Geprüft wurde, ob parallel dazu die Lichtgeschwindigkeit in einem Labor auf der Erde variiert – was das Grundpostulat von Einsteins Spezieller Relativitätstheorie verletzen würde.

die Konstanzer Wissenschaftler einen Laserstrahl ein. Damit er eine stehende Welle bilden konnte, musste seine Wellenlänge ein Teiler der Resonatorlänge sein. Ein Rückkopplungsmechanismus sorgte dafür, dass diese Resonanzbedingung ständig erfüllt war. Zugleich maß eine Atomuhr kontinuierlich die Frequenz des Lasers. Diese ist aber über die Lichtgeschwindigkeit mit der Wellenlänge verknüpft. Eine Änderung der Lichtgeschwindigkeit hätte bei konstanter Wellenlänge also die Frequenz verschieben müssen, was mit Hilfe der Atomuhr nachweisbar gewesen wäre.

Die Messungen über ein Jahr hinweg ergaben erwartungsgemäß keine solche Verschiebung und damit auch keine Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Relativgeschwindigkeit der Erde (und des Labors in Konstanz) gegenüber dem Fixsternhimmel. Die Genauigkeit lag bei zwei tausendstel Prozent. Damit war sie zwar nur dreimal so hoch wie bei den präzisesten bisherigen Messungen, doch die Forscher sind zuversichtlich, sie mit einer besseren Atomuhr in naher Zukunft nochmals um das Hundertfache steigern zu können.

Auch winzige Abweichungen, wie sie jetzt noch denkbar sind, würden Einsteins Theorie freilich nicht zu Fall bringen, sondern nur ihre Grenzen aufzeigen – so wie die Spezielle Relativitätstheorie ihrerseits die newtonschen Gesetze nicht widerlegt, sondern nur für den Grenzfall

NACHGEHAKT

Für eine Pädagogik der Wirklichkeit

Macht Fernsehen gewalttätig? Zweifellos bringt „die Glotze“ binnen Stunden mehr Gräuel, Verwüstung, Krieg und Verbrechen vor unsere Augen, als der Alltag normalerweise in Jahren liefert – zumindest in unseren relativ friedlichen Breiten. Daraus folgern manche, das wirke als Ermunterung und Einübung, im Konfliktfall selbst gleichfalls Gewalt anzuwenden. Andere meinen im Gegenteil, das Miterleben – oder im Fall von kriegerischen Computerspielen: Ausagieren – von nicht wirklichen, nur elektronisch vorgespielten Gewalttaten mindere sogar die Bereitschaft, selbst wirklich brutal zu handeln.

Was von beidem stimmt nun? Eine typische Frage an die empirische Forschung, aber trotz ihrer trügerischen Einfachheit schwer zu beantworten. Immerhin liegt seit kurzem das Ergebnis einer umfangreichen, methodisch sauberen Langzeitstudie vor: Über viele Jahre hinweg hat sie den Zusammenhang zwischen jugendlichem Fernsehkonsum und späterer Gewaltbereitschaft untersucht (*Science, Bd. 295, S. 2468*).

Über 17 Jahre hinweg beobachteten der Psychologe Jeffrey G. Johnson und sein Team von der New Yorker Columbia University nicht weniger als 707 Familien. Dabei diagnostizierten sie eine signifikante Korrelation zwischen exzessivem Fernsehen im Jugendalter (drei Stunden täglich oder mehr) und späteren Gewalttaten. Zugleich konnten sie statistisch den nahe liegenden Einwand ausschließen, ihre jugendlichen Vielseher seien gar nicht durch zu viel Fernsehen verroht, sondern durch Vernachlässigung, Armut der Eltern, gewalttätiges Umfeld („bad neighbourhood“) oder psychische Störungen.

Allerdings registrierte Johnsons nur pauschal die vor dem Fernsehgerät verbrachte Zeit und nicht speziell die Stunden mit gewalttätigen Programminhalten. Andere Untersuchungen in den USA fanden für Fernseh-gewalt einen Anteil von sechzig Prozent am Gesamtangebot. Das könnte bedeuten, dass die neue Studie die aggressionsfördernde Langzeitwirkung spezifisch gewalttätiger Sendungen eher noch unterschätzt – denn die gezeigten Gewalttaten wurden ja quasi verdünnt durch die übrigen vierzig Prozent mit Kinder-, Tier-, Koch- und Ratesendungen.

Doch es könnte auch bedeuten, dass gar nicht die Gewalt *im* Fernsehen mit der Zeit gewalttätig macht, sondern vielmehr die Gewalt des Mediums Fernsehen selbst: Vielleicht kommt es beim Fernsehen auf den Inhalt gar nicht so sehr an.

Wie der Psychologe Mihaly Csikszentmihalyi und der Medienpädagoge Robert Kubey herausfanden (Spektrum der Wissenschaft 5/2002, S. 70), fesselt stundenlanges Fernsehen vor allem durch formale Tricks: rasante Bildwechsel, schnelle Schnitte, akustische Schocks. Diese pausenlose Überreizung hinterlässt den Vielseher, wenn er endlich doch abschaltet, besonders missmutig, frustriert – und somit tendenziell aggressiv. So gesehen ist vielleicht in der Tat bereits das Medium die Botschaft: Nicht der Programminhalt macht gewaltbereit, sondern das Fernsehen als solches.

Das dürfte erst recht für interaktive Spiele am Computer gelten. Dabei ist es letztlich wohl ziemlich egal, ob Jugendliche am Bildschirm Moorhühner oder maskierte Terroristen abschießen. Entscheidend ist die Derealisierung des Handelns. Zunächst wird ja nur das Aus-der-Welt-Schaffen virtueller Objekte geübt. Die Übertragung auf reale Menschen erscheint umso näher liegend, je echter einerseits die realistische Computergrafik wirkt und je virtu-

sehr hoher Geschwindigkeiten modifiziert hat.

Selbst der bloße Nachweis der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit mit immer höherer Genauigkeit hätte mehr als nur ideellen Wert. Seit Jahrzehnten nämlich bemühen sich theoretische Physiker, die beiden Grundpfeiler der modernen Physik – die Quantenmechanik und Einsteins Gravitationstheorie – miteinander in Einklang zu bringen. Einige ihrer Lösungsansätze, zu denen die String-Theorien gehören, sagen eine leichte Verletzung der Prinzipien der speziellen Relativität voraus. Je genauer deren Gültigkeit experimentell überprüft wird, desto sicherer lassen sich deshalb diejenigen Quanten-Gravitationstheorien ausschließen, die eine zu große Verletzung vorhersagen. Trotz eventueller Enttäuschungen kann dies den Theoretikern freilich nur recht sein, da sich ihre komplizierten Formeln auf anderem Wege bisher nicht nachprüfen lassen. ■

Oliver Morsch *ist Physiker und forscht als Postdoktorand an der Universität Pisa.*

eller andererseits das reale Leben anmutet, das ohnedies – auch bei den Erwachsenen – zu einem immer größeren Teil vor Bildschirmen stattfindet.

Jedenfalls belegen die neuen Studien, dass allein die bloße Dauer jugendlichen Fernsehkonsums die Gefahr erhöht, später sozial auffällig zu werden. Nach der erschreckenden Tat des Erfurter Schülers, der – maskiert wie die Figur eines Computerkampfspiels – im April 17 Menschen erschoss, wurde einige Wochen lang erregt über den Anteil gewalttätiger Fernseh- und Spielprogramme an der Verrohung Jugendlicher spekuliert. Es reicht aber im Licht der empirischen Beweislage gewiss nicht, nur beim Bildschirminhalt anzusetzen. Entscheidend ist, was sich im Empfänger abspielt. Er braucht längst nicht mehr nur medienpädagogische Unterstützung, sondern das Angebot eines ganz neuen Fachs namens Wirklichkeitspädagogik. Dort müsste er lernen, dass manche Bewegungen eben nicht nur ein Verrücken der Maus bedeuten, dass manches Drücken eines Auslösers mehr ist als das von „Space“ oder „Enter“.

Michael Springer

Der Autor ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.

ASTRONOMIE

Der Staubring unserer Sonne

Jenseits der Saturnbahn wurde nun ein Staubring ähnlich denen unserer Nachbarsterne Wega und Beta Pictoris entdeckt. Aus seiner Struktur könnten Astronomen in fernen Zivilisationen auf die Existenz von Planeten im Sonnensystem schließen.

Von Markus Landgraf

Satelliten wie der amerikanische Infrared Astronomy Satellite (Iras) und das europäische Infrared Space Observatory (Iso) brachten es vor zwanzig Jahren ans Licht: Viele junge Sterne sind von einer Scheibe aus kosmischem Staub umgeben. Nur so war der Überschuss an Strahlungsenergie im infraroten Bereich ihrer Spektren zu erklären. Er wies darauf hin, dass die neu entstandenen Sterne von einer Ansammlung kleiner Partikel umgeben sind, die sich auf einige hundert Grad Kelvin erwärmt haben.

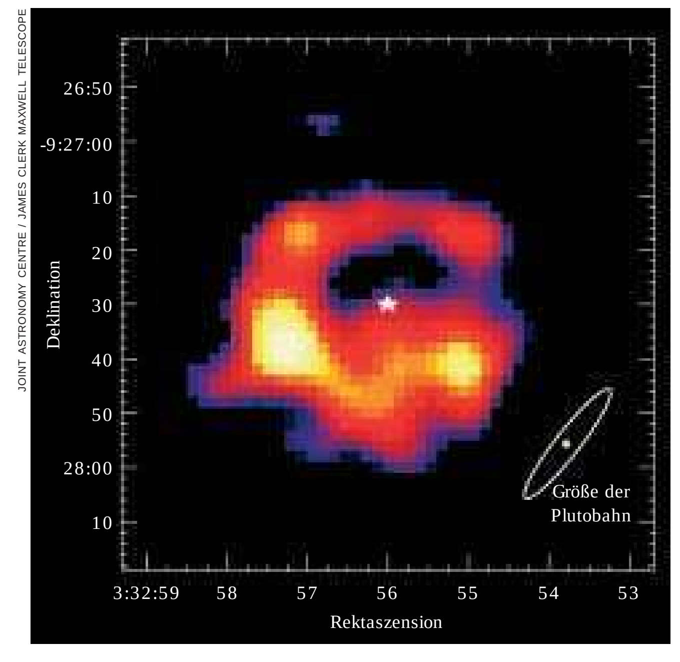
Das war eine aufregende Entdeckung. Denn die Staubhüllen schienen Überbleibsel des Urnebels zu sein, aus dem die stellaren Objekte hervorgegangen waren. Die Infrarot-Teleskope lieferten damit die ersten Momentaufnahmen aus dem Endstadium der Sternengeburt. Doch die Staubscheiben bargen womöglich noch ein größeres Geheimnis: In ihnen könnte auch jener Vorgang ablaufen, bei dem durch weitere Zusammenballung von Materie Planeten entstehen. Diese würden sich eventuell dadurch verraten, dass sie alles Material längs ihrer Umlaufbahn aufsammeln und so einen leeren Ring in der Staubscheibe erzeugen.

Allerdings dämpften Modellrechnungen allzu optimistische Erwartungen. Danach kann eine Staubscheibe mit einem Durchmesser von hundert Astronomischen Einheiten – eine Astronomische Einheit (AE) entspricht der mittleren Entfernung zwischen Erde und Sonne – maximal hundert Millionen Jahre existieren, bevor sie durch Kollisionen der Partikel untereinander und Verdampfung zerstört wird. Für die Bildung und Beobachtung von Planeten ist dies eine kurze Zeit.

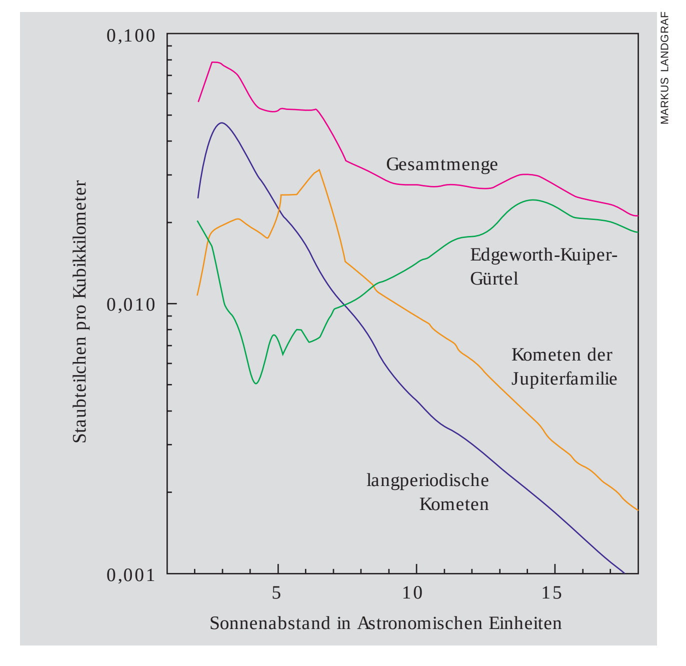
Doch dann gab es eine große Überraschung: Weitere Infrarot-Aufnahmen zeigten auch Staubscheiben um so genannte Hauptreihensterne wie die Sonne, die ihr Jugendstadium längst hinter sich haben. Sie sind in der Regel mindestens eine Milliarde Jahre alt. Wenn sie eine Hülle aus kleinen Partikeln aufweisen, muss diese also durch neuen Staub stetig nachgebildet werden. Als Quellen für den Nachschub kommen nur größere Objekte wie Asteroiden oder Kometen in Frage, die den Stern umkreisen. Wenn sie miteinander kollidieren und dabei zertrümmert werden, liefern sie das beobachtete feine Material.

Der erste Hauptreihenstern, um den eine Staubscheibe entdeckt wurde, war die nur 26 Lichtjahre entfernte Wega im Sternbild Leier (Spektrum der Wissenschaft 10/1983, S. 20). Aus diesem Grund wird die Existenz einer solchen Scheibe um einen Hauptreihenstern heute allgemein als Wega-Phänomen bezeichnet.

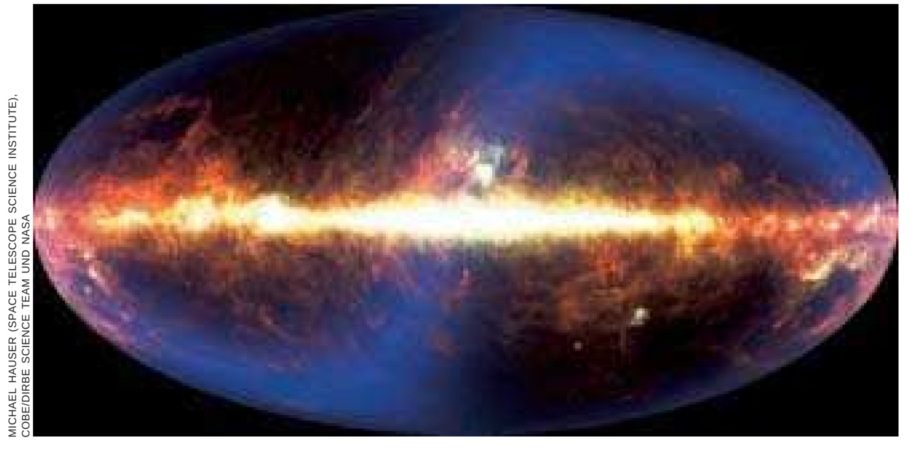
Eine zentrale Frage nach dieser Entdeckung lautete: Wie groß sind die Staubkörner? Den Infrarotbildern war die Antwort nicht zu entnehmen. Aufschluss gaben erst Beobachtungen im Submillimeterbereich des elektromagnetischen Spektrums. Sie wurden unter anderem mit dem 1987 errichteten James-Clerk-Maxwell-Teleskop (JCMT) auf dem Mauna Kea auf Hawaii gemacht. Mit ihm gelangen Ende der 1990er Jahre spektakuläre Aufnahmen von Sternen mit Wega-Phänomen. Beim 10,5 Lichtjahre entfernten System Epsilon Eridani zum



Die Staubscheibe um den Hauptreihenstern Epsilon Eridani zeigt sich auf dieser farbcodierten Aufnahme im Submillimeter-Wellenlängenbereich. Sie hat einen Durchmesser von etwa 120 Astronomischen Einheiten (Bahnradien der Erde). Der Stern selbst ist nicht zu sehen und verrät sich nur indirekt durch ein zentrales Loch mit einem Radius von 35 Astronomischen Einheiten.



Die Staubscheibe des Sonnensystems setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Ihr innerer Bereich wird von Material aus Kometen dominiert. Den Staub in den äußeren Regionen liefern dagegen Kollisionen zwischen Objekten im Edgeworth-Kuiper-Gürtel. Gezeigt ist das Konzentrationsprofil von Staubkörnern mit Durchmessern von mehr als 0,025 Millimetern.



Die innere Staubwolke des Sonnensystems, die von Asteroiden und Kometen innerhalb der Jupiterbahn herrührt, zieht sich auf dieser farbcodierten Aufnahme des Satelliten Cobe im Submillimeterbereich als bläuliche S-Kurve von links unten nach rechts. Das helle Band quer durch das Zentrum des Bildes stammt vom Staub in der Galaxis.

Beispiel, das zwischen einer halben und einer Milliarde Jahre alt ist, überstrahlt eine 120 AE große Scheibe im Submillimeterbereich den zentralen Stern deutlich, während sie im optischen oder infraroten Licht viel dunkler erscheint (Bild links unten; der Bahnradius des Saturn beträgt ungefähr 80 AE). Der enthaltene Staub besteht demnach aus Partikeln mit Durchmessern von etwa einem zehntel Millimeter.

Als Nächstes erhob sich damit die Frage, ob vielleicht auch unser Sonnensystem von einer solchen Staubscheibe umgeben ist. Ein konkretes Indiz dafür lieferte in den 1990er Jahren die Entdeckung des Edgeworth-Kuiper-Gürtels außerhalb der Neptunbahn mit seinen kometenartigen Objekten (Spektrum der Wissenschaft 7/1996, S. 56). Deren Größenverteilung lässt auf regelmäßige Kollisionen schließen, bei denen auch sehr kleine Trümmer anfallen. Diese könnten sich zu einer Staubscheibe ähnlich der von Epsilon Eridani ansammeln.

Doch ist weder bekannt, wie häufig solche Kollisionen stattfinden, noch mit welcher Wahrscheinlichkeit dabei kleine Fragmente entstehen. Deshalb blieb zunächst offen, ob der Kuiper-Gürtel genügend Material liefert, um eine Staubscheibe aufrechtzuerhalten. Bei der Suche nach ihr halfen auch Infrarot-Teleskope in Erdumlaufbahnen nicht weiter. Denn ihnen verwehrt der Staub, den Asteroiden und Kometen innerhalb der Jupiterbahn abgeben, den klaren Blick auf weiter außen gelegene Regionen des Sonnensystems.

Allerdings gibt es schon seit langem sogar direkte Staubmessungen in den Weiten jenseits von Neptun und Saturn. In den 1970er und 1980er Jahren erforschten die beiden Pioneer-Raumsonden die äußersten Grenzen unseres Sonnensystems. An Bord befanden sich auch Instrumente für den Nachweis kosmischer Staubteilchen. Sie registrierten das Durchlöchern einer dünnen Metallfolie, die ein Druckgas einschloß. Somit erfasste der Detektor alle Teilchen, die groß und schnell genug waren, die Folie zu durchdringen. Für jeden solchen Einschlag speicherte der Bordcomputer den genauen Zeitpunkt. In bestimmten Intervallen wurden die gesammelten Daten dann zur Bodenstation übertragen.

Freilich bestanden Zweifel, ob die von den Pioneer-Sonden registrierten Teilchen wirklich zu einem Staubring um das Sonnensystem gehören. Im Prinzip könnten sie auch aus anderen Quellen stammen. Denkbar wären insbesondere langperiodische Kometen oder das interstellare Medium.

Schatzsuche in alten Daten

Meinen Kollegen und mir gelang es nun jedoch, diese beiden Möglichkeiten auszuscheiden. So zeigten wir mit Modellrechnungen, dass sich Staubpartikel von langperiodischen Kometen im inneren Sonnensystem konzentrieren. Daher können sie Messungen außerhalb der Umlaufbahn des Saturns nicht nennenswert verfälschen.

Den Anteil von Teilchen aus dem interstellaren Medium abzuschätzen war schwieriger. Wichtige Informationen dazu lieferte die Sonde Ulysses, die von 1990 bis 1995 außerhalb der Ebene der Planetenbahnen (Ekliptik) die Sonne umrundete. Dabei stieß sie auf kleine Partikel, die wegen der Richtung, aus der sie kamen, nicht zu unserem Sonnensystem gehören konnten. Demnach enthält das lokale interstellare Medium tatsächlich auch kosmischen Staub, und es könnten seine Teilchen gewesen sein, die auf die Detektoren der Pioneer-Sonden trafen.

Um diese Möglichkeit zu prüfen, analysierten wir die vom Staubmesser an Bord von Ulysses gesammelten Daten genauer. Dabei stellten wir fest, dass die registrierten Teilchen in ihrer weit überwiegenden Mehrzahl zu klein waren, um die Metallfolie im Detektor der Pioneer-Sonden zu durchdringen. Partikel mit ausreichender Größe machten nur einen verschwindend geringen Anteil aus. Sie allein könnten allenfalls etwa ein Prozent der Staubkonzentration erklären, die von den Pioneer-Sonden außerhalb der Saturnbahn gemessen wurde. Die Teilchen dort müssen also zum allergrößten Teil vom Edgeworth-Kuiper Gürtel stammen.

Ihre Dichte beträgt den Pioneer-Daten zufolge etwa ein Partikel pro fünfzig Kubikkilometer. Um solch eine Konzentration aufrechtzuerhalten, müssen durchschnittlich pro Sekunde fünfzig Tonnen Staub produziert werden. Dazu genügt es, dass alle sechzig Jahre ein Objekt pulverisiert wird, das eine Masse wie der Kern des Halleyschen Kometen hat – eine realistische Annahme.

Damit ist die Staubscheibe unserer Sonne hell genug, um mit einem Infrarot-Teleskop noch in dreißig Lichtjahren Entfernung sichtbar zu sein. Gäbe es dort Astronomen, die über solch ein Instrument und die nötigen theoretischen Grundlagen verfügten, wären sie in der Lage, die Existenz des Neptuns aus der Form der Scheibe und der darin erkennbaren Strukturen abzuleiten. Aus der Tatsache, dass der Staubring nach innen deutlich an Helligkeit verliert, könnten sie zudem schließen, dass es in unserem Sonnensystem noch mindestens einen weiteren Planeten geben muss: Jupiter.

Umgekehrt eröffnet diese Erkenntnis eine verblüffend einfache neue Methode zum Nachweis extrasolarer Planeten. Diese sind in der Regel viel zu dunkel, um direkt beobachtbar zu sein. Bisher wurde ihre Existenz indirekt durch Messung ihres winzigen gravitativen Einflusses auf die Bahn des zugehörigen Zentralsterns erschlossen. Nun besteht zusätzlich die Möglichkeit, bei nahe gelegenen Sternen mit Wega-Phänomen die Struktur der Staubscheibe zu analysieren und zu prüfen, ob sie die Anwesenheit von Planeten verrät. ■

Markus Landgraf *analysiert am Europäischen Weltraum-Operationszentrum in Darmstadt geplante Missionen der Europäischen Weltraumagentur Esa. Den Staubring um die Sonne entdeckte er als Postdoktorand am Johnson-Raumfahrtzentrum der Nasa in Houston (Texas).*

(Seiten 18, 19 und 20: Anzeige und Beihefter)

MIKROBIOLOGIE

Reiter auf der Feuerkugel

An heißen Quellen am Meeresgrund stießen Forscher auf das bisher kleinste Lebewesen. Mit gerade nur dem theoretisch geforderten Minimalsatz an Genen ist es so ungewöhnlich, dass es eine neue Abteilung im Urreich der Archaeen begründet.

Von Michael Groß

Erinnern Sie sich? Vor sechs Jahren machten angebliche Bakterien vom Mars Schlagzeilen. Nasa-Wissenschaftler entdeckten auffällige Strukturen in dem Meteoriten ALH84001, der einst vom Roten Planeten zu uns gelangt war, und interpretierten sie als versteinerte Überreste von Mikroben. Die vermeintlichen Mikrofossilien sahen irdischen Bakterien durchaus ähnlich, waren mit einer Länge von nicht einmal hundert Nanometern (millionstel Millimetern) aber nur knapp ein Zehntel so groß.

Auf Begeisterung stieß diese Meldung bei all jenen, die Leben auf dem Mars für möglich halten. Außerdem fühlte sich eine kleine Gruppe von Forschern bestätigt, die meint, ähnliche Winzlinge müssten auch die Erde bevölkern – obwohl außer theoretischen Spekulationen, fragwürdigen fossilen Spuren und ebenso zweifelhaften Erbsubstanz-Nachweisen durch Fluoreszenz nichts Handfestes dafür spricht.

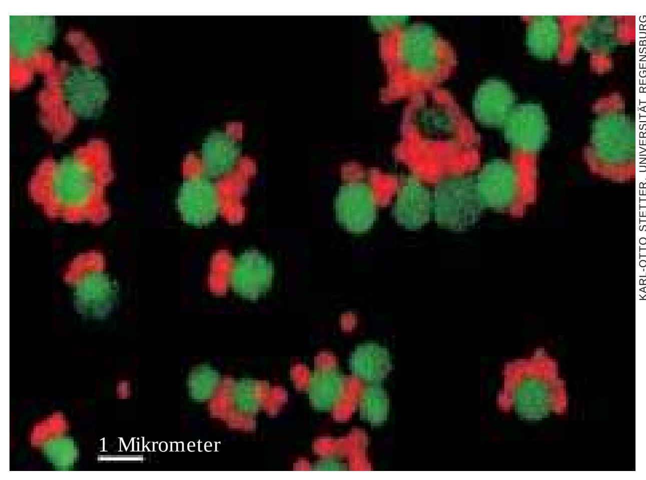
Die Mehrheit der Mikrobiologen nahm derlei Nanobakterien oder „Nanoben“, wie sie in Anlehnung an Mikroben getauft wurden, denn auch ebenso wenig ernst wie die Behauptungen über fossile Organismen in Marsmeteoriten. Allein um die für die Lebensvorgänge notwendigen molekularen Maschinen in eine Zellmembran einzupacken, würde ein Membranschlauch mit 50 Nanometern Durchmesser bei weitem nicht ausreichen, argumentieren sie – schließlich messe ein Ribosom, die Proteinfabrik der Zelle, allein schon 25 Nanometer. Außerdem war es nie gelungen, eine der behaupteten Nanoben im Labor zu kultivieren.

Doch nun gibt es erstmals unwiderlegliche Beweise für einen Winzling, der mit 400 Nanometern Durchmesser zwar nicht ganz so klein ist wie die angeblichen Marsbakterien, aber doch alles weit unterbietet, was im Mikrobenreich bisher als Zwerg galt. Wissenschaftler um Karl-Otto Stetter am Archaeenzentrum der Universität Regensburg entdeckten die neuartigen Nanoben als Trittbrettfahrer in der Kultur eines anderen Organismus. Diesen hatte Harald Huber aus Stetters Gruppe vor zwei Jahren auf dem Kolbeinsey-Rücken, einem submarinen Vulkangebiet nördlich von Island, in 120 Meter Tiefe aufgespürt. Er gehört zu den urtümlichen Archaeen, die wegen etlicher Besonderheiten von den echten Bakterien, den Eubacteria, unterschieden werden. Eine dieser Eigentümlichkeiten ist, dass sich viele Archaeen nur unter Extrembedingungen richtig wohl fühlen. So gedeiht die von Huber aufgefundene Art am besten bei Temperaturen um 90 Grad Celsius, was ihr den Namen *Ignicoccus* („Feuerkugel“) eintrug.

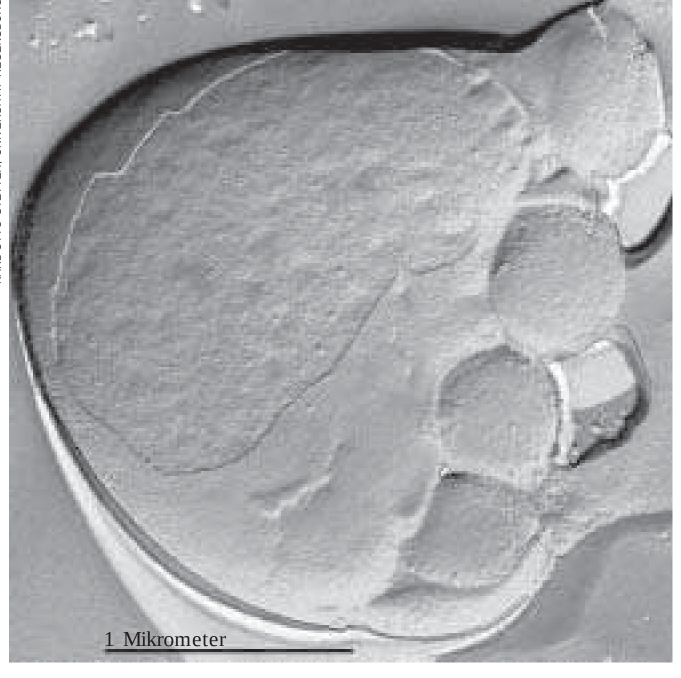
Doch das blieb nicht ihre einzige Besonderheit. Unter dem Mikroskop im Regensburger Labor wartete die Feuerkugel mit einer weiteren Überraschung auf: Auf ihrer Oberfläche saßen winzige Knöllchen, nur wenig größer als ein Pockenvirus. Anfärbeexperimente zeigten, dass sie DNA enthielten. Außerdem waren sie von einem so genannten S-Layer umgeben, einer im Archaeenreich typischen Sorte von Zellhülle. Handelte es sich um eigenständige Organismen, die womöglich einer bisher unbekannten Archaeen-Art angehörten?

Unpassender Angelhaken

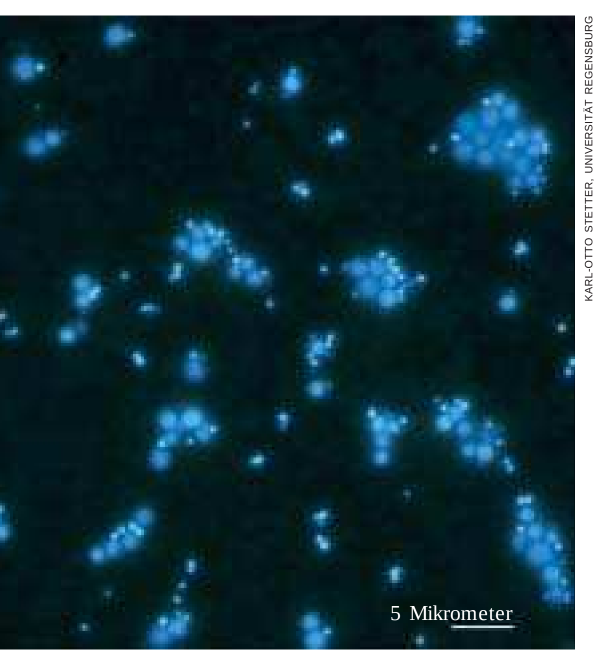
Das festzustellen erwies sich als schwierig. Zusammen mit den *Ignicocci* gedeihen die Knöllchen zwar prächtig; im Durchschnitt kommen zwei von ihnen auf eine Feuerkugel. Aber eine Kultivierung ohne den großen Partner gelang bisher nicht. Wohl lösen sich die Anhängsel von ihren Trägern, sobald die Nährstoffe im Kulturmedium zur Neige gehen. Dann kann man sie durch einfache Mikrofiltration abtrennen. Doch für sich allein vermehren sie sich nicht mehr. Da nutzt es ▶

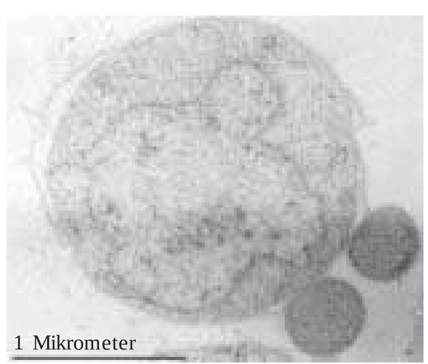


KARL-OTTO STETTER, UNIVERSITÄT REGENSBURG



Die spezifische Fluoreszenzfärbung im Lasermikroskop (oben) macht es deutlich: Das neu entdeckte winzige *Nanoarchaeum equitans* (rot) unterscheidet sich von seinem Wirt *Ignicoccus* (grün) durch eine ungewöhnliche Form von Baustein (rRNA) für die zellulären Eiweißfabriken. In der Elektronenmikroskop-Aufnahme (rechts) von *N. equitans* (kleine Zellen) und *Ignicoccus* (große Zelle) nach Gefrierätzung erkennt man die wabenartige Struktur des für Archaeen typischen „S-Layer“.





KARL-OTTO STETTER, UNIVERSITÄT REGENSBURG

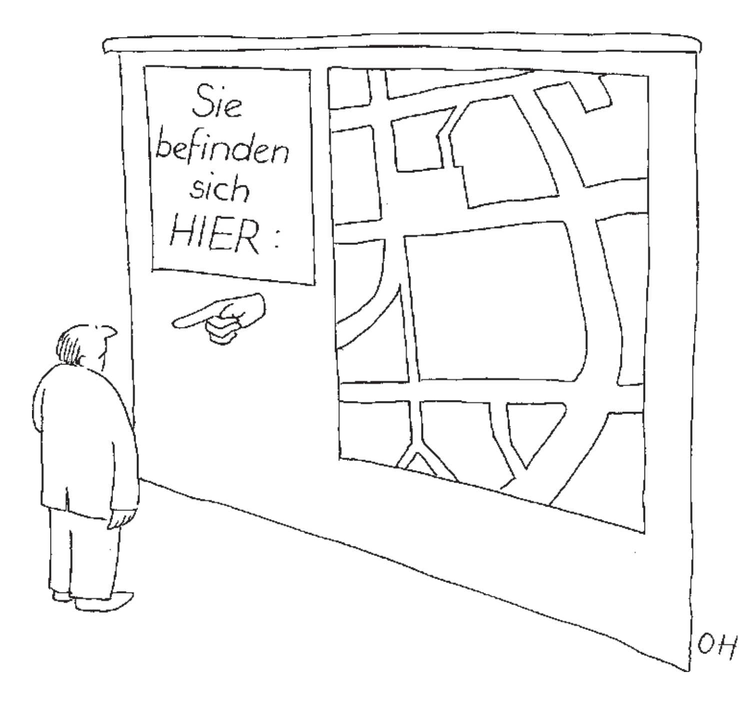
Auf der elektronenmikroskopischen Aufnahme (oben) des Ultradünnschnitts einer Zelle von *Ignicoccus* mit zwei anhaftenden *Nanoarchaeum equitans* ist erkennbar, dass beide Partner von eigenen Membranen umhüllt sind. Sie lassen sich nur zusammen züchten. Nach Behandlung mit einem für DNA spezifischen Fluoreszenzfarbstoff (links) leuchtet eine Co-Kultur von mit *Ignicoccus* (große Kugeln) und *N. equitans* (kleine Kügelchen) in Blau.

auch nichts, abgetötete Zellen von *Ignicoccus* zuzugeben. Selbst lebende Feuerkugeln hinter einer durchlässigen Membran reichen nicht. Die Winzlinge gedeihen erst wieder, wenn sie sich auf ihrem Wirt ansiedeln können.

Um dennoch nachzuweisen, dass es sich um eine eigene Spezies und nicht etwa um Ableger oder Viren handelt, fischten die Regensburger Mikrobiologen mit speziellen Sonden nach einem Gen, über das jedes Lebewesen verfügt. Es enthält den Bauplan für die so genannte ribosomale RNA, die den Hauptbestandteil der zellulären Proteinfabriken bildet.

Der Versuch verlief jedoch zunächst enttäuschend: An die Angel ging nur das Gen von *Ignicoccus* selbst. Aber das Stetter-Team gab nicht auf und entdeckte bei eingehenderen Studien den Grund für den Fehlschlag: Die Kügelchen verfügen über eine ribosomale RNA, die sich von allen bekannten Versionen so radikal unterscheidet, dass die herkömmlichen Sonden das zugehörige Gen nicht erkennen.

Das bewies nicht nur, dass es sich bei den Knöllchen um eine eigene Art handelt, sondern dass sie auch eine Sonderstellung unter den bekannten Archaeen einnimmt. Deshalb mussten die Forscher gleich eine neue Abteilung für sie einrichten, die sie Nanoarchaeota nannten. Sie steht nun gleichrangig neben drei anderen Hauptabteilungen im Urreich der Archaea. Der Winzling selbst erhielt, weil er auf der Feuerkugel „reitet“, den Namen *Nanoarchaeum equitans.*



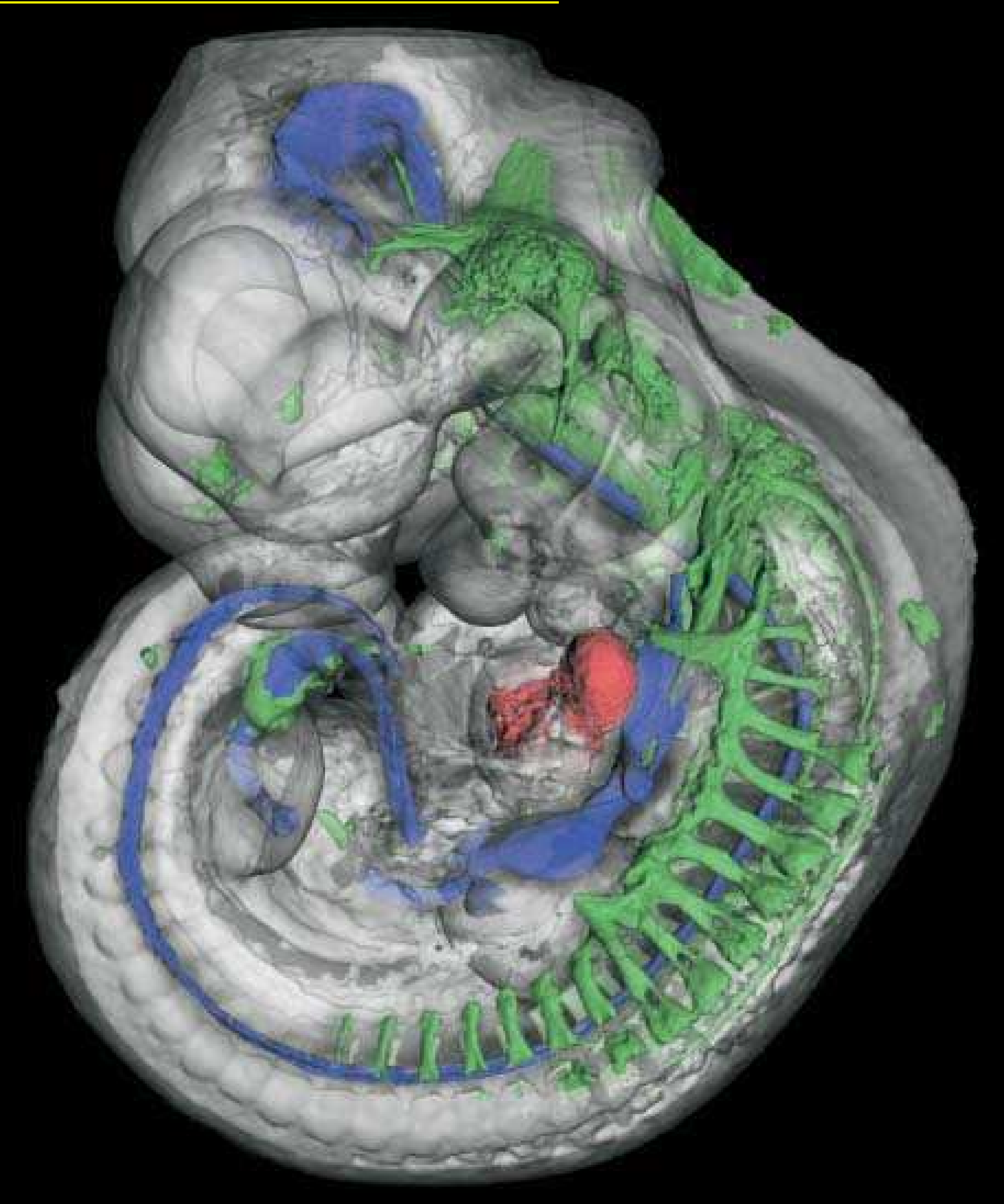
Er dürfte nicht lange allein bleiben. Mit neuartigen Sonden, die der Besonderheit dieses Organismus Rechnung tragen, wird man wohl alsbald auch Vettern und Cousinen von ihm aufspüren. Dass diese ganze Sippschaft so lange unerkannt blieb, weist auf ein fundamentales Problem der Mikrobiologie hin. Um eine neue Art zweifelsfrei beschreiben und einordnen zu können, müssen die Forscher sie im Labor kultivieren. Dies gelingt aber nur für einen verschwindend kleinen Bruchteil der in der Natur vorkommenden Arten. Speziell im Urreich der Archaeen sind viele Organismen lediglich in Gestalt von Genschnipseln bekannt, die Wissenschaftler aus der freien Wildbahn gefischt haben. Und die Dunkelziffer der Arten, die dabei durch die Maschen geschlüpft sind, liegt vermutlich sehr hoch.

Damit entgehen den Mikrobiologen möglicherweise ganze Horden von ungewöhnlichen oder urtümlichen Organismen, die faszinierende Aufschlüsse über die Frühzeit der Evolution und die Grenzen des Lebens auf der Erde geben könnten. Der jetzt entdeckte zwergenhafte Feuerreiter zum Beispiel besitzt eines der kleinsten bekannten Genome. Mit weniger als einer halben Million DNA-Buchstaben umfasst es vermutlich nicht einmal 400 Gene. Dieser Wert liegt sehr nah an dem von Theoretikern formulierten Minimalsatz für eine lebende Zelle.

Es wäre verlockend, daraus zu folgern, dass *N. equitans* auf einer frühen Stufe der Evolution des Lebens stehen geblieben ist. Ebenso gut könnte aber auch das Gegenteil zutreffen: dass die Nanobe auf Grund einer hochspezialisierten Lebensweise im Laufe der Zeit reihenweise Gene verlor, die sie nicht mehr benötigte. Erst wenn weitere Mitglieder der Nanoarchaeota als Vergleichsobjekte vorliegen, wird sich entscheiden lassen, ob dieser Zwerg sein genetisches Minimalprogramm einem Stillstand oder einer Schrumpfkur verdankt. Und erst wenn wir sehr viel mehr über die Archaeen wissen, werden wir in der Lage sein, sinnvolle Aussagen über mögliches Leben auf anderen Planeten zu machen. Solange uns selbst auf der Erde ein Großteil der Mikrobenarten durch die Lappen geht, können wir unmöglich ausschließen, dass sich auf dem Mars vielleicht doch exotische Lebensformen tummeln, die sich unsere Lehrbuchweisheit bisher nur einfach nicht träumen ließ. ■

Michael Groß *ist Biochemiker und Honorary Science Writer in Residence am Birkbeck College in London.*

Der gläserne Embryo



JAMES SHARPE ET AL. SCIENCE, BD. 296, S. 543

Eines der spannendsten Gebiete der modernen Biologie ist die Erforschung der Embryonalentwicklung. Welche Gene werden wann und wo in dem heranwachsenden Keim aktiv? Bei Säugetieren ist das allein schon wegen der Größe der Embryonen schwierig festzustellen; deshalb werden vor allem Taufliegen und Zebrafische untersucht. Nun hat ein Team um James Sharpe in Edinburgh ein schnelles, billiges und genaues Verfahren entwickelt, das dreidimensionale Aktivierungsmuster von Genen in bis zu 1,5 Zentimeter großen kompletten Embryonen liefert. Diese „optische Projektions-Tomografie“ ähnelt der Computertomografie in der Medizin, benutzt aber statt Röntgenstrahlung normales Licht. Dadurch lassen sich Regionen, in denen ein Gen aktiv ist, mit Farbmarkern kennzeichnen. Vor der Untersuchung wird der Embryo mit Chemikalien durchscheinend gemacht. Hier zeigen gleich zwei Farbmarker in einem zehn Tage alten Maus-Embryo aktive Gene im Neuralrohr/Endoderm (blau) und in den Nervenbahnen (grün). Das blutgefüllte Herz leuchtet von sich aus rot.





Morgendämmerung am Ufer des Tethys-Meeres, 48 Millionen Jahre vor unserer Zeit: Für einen tapirähnlichen Säuger ist es kein guter Tag. Ein *Ambulocetus*-Urwal (oben links) bricht aus den Mangroven hervor. Sein Verwandter *Rodhocetus* (vorne) begnügt sich mit Fischen zum Frühstück.

KAREN CARR

EVOLUTION

Wale der Urzeit

Wer waren die Vorfahren heutiger Wale, Delfine und Tümmler? Neue Fossilienfunde und DNA-Analysen bringen Licht ins Dunkel der Evolution.

Von Kate Wong

Tethys, Meer der Urzeit, etwa 48 Millionen Jahre vor unserer Zeit. Dort, wo dereinst Pakistan liegen wird, bewachsen dichte Mangrovenwälder die Brackwasserzonen. Insekten schwirren durch die tropische Luft. Neugierig nähert sich ein junges *Eotinatops*, das heutigen Tapiren ähnelt, dem Ufer. Ein Fehler, denn plötzlich schießt ein lang gestreckter Räuber aus seinem Versteck unter den Mangrovenwurzeln hervor. Mit mächtigen Kiefern packt er sein Opfer und zieht es unter Wasser, hält es dort, bis es ertrinkt. Mit seinen kräftigen Hinterbeinen schiebt sich das Raubtier dann ans Ufer, um dort seine Beute zu verzehren.

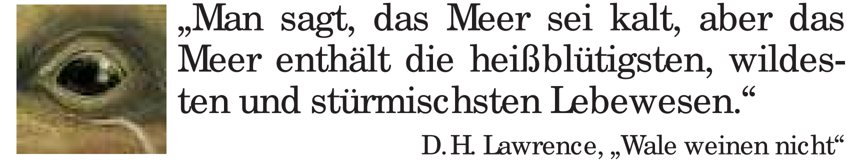
Der erfolgreiche Jäger erinnert auf den ersten Blick an ein Krokodil, mit seinen kräftigen, kurzen Beinen, dem massiven Schwanz, einer langen Schnauze und Augen hoch oben am Schädel. Doch Haare statt Panzerplatten bedecken den Körper, und an den Zehen trägt er Hufe statt Krallen. Denn dieser im Wasser lauernde *Ambulocetus* ist ein Säugetier. Charakteristische Höcker auf den mächtigen Zähnen legen einen überraschenden Schluss nahe: Der Räuber ist ein Vorfahr der Wale, eine Zwischenstation auf dem Weg vom Land ins Meer.

Heute gibt es mehr als achtzig Arten von Walen, Delfinen und Tümmlern. Viele sind durch den Menschen in ihrer Existenz bedroht, doch einstmals waren sie die Herrscher der Meere. Ihren Wer-

degang verstehen Wissenschaftler erst seit kurzem, und nach wie vor bleibt manches Rätsel zu lösen. Denn ohne Fell und ohne Hinterbeine, unfähig, für einen Schluck Süßwasser an Land zu kriechen, ähneln die Meeressäuger so wenig ihren Verwandten an Land, dass die Stammesgeschichte aus anatomischen Vergleichen nicht zu erschließen ist.

Dementsprechend beschrieb Hermann Melville seinen weißen Wal „Moby Dick" 1851 auch als Fisch. Ein Irrtum allerdings, dem Naturforscher dieser Zeit wie Charles Darwin (1809–1882) längst nicht mehr erlagen. Sie wussten, dass es sich um Säugetiere handelte – schließlich atmeten sie Luftsauerstoff, waren warmblütig und ernährten ihre Jungen mit Milch. Und da die Ursäuger nun mal an Land gelebt hatten, sollten auch Wale von landlebenden Vorfahren abstammen. Darwin selbst bemerkte in seinem „Ursprung der Arten", dass ein schwimmender Bär, der mit aufgesperrtem Maul Insekten zu fangen versuchte, doch ein denkbarer Ausgangspunkt für die Stammesgeschichte der Wale sei, ein Vorschlag, der allgemein Heiterkeit erregte.

Fossilien, aus denen Forscher den Werdegang hätten ablesen können, hatte man im 19. Jahrhundert noch nicht gefunden. Was man hatte, war entweder zu unvollständig oder schon zu jung, also nicht mehr ursprünglich genug. Noch hundert Jahre nach Darwin stellten diese Wassersäuger ein scheinbar unlösbares Rätsel dar. George Gaylord Simpson (1902–1984), ein berühmter Paläontologe, bemerkte in seinem Standardwerk über die Klassifikation der Säugetiere, Wale seien schon so lange in den Ozeanen zu Hause, dass es keine Hinweise auf ihre Herkunft mehr gäbe. Er nannte sie „die merkwürdigsten und meist abweichend gebauten Säuger" und platzierte sie willkürlich zwischen die anderen Ordnungen.





„Man sagt, das Meer sei kalt, aber das Meer enthält die heißblütigsten, wildesten und stürmischsten Lebewesen."

D.H. Lawrence, „Wale weinen nicht"

Doch in den letzten zwanzig Jahren hat sich die Situation grundlegend geändert. Paläontologen haben eine Vielfalt von Walfossilien aus dem Eozän entdeckt, dem Erdzeitalter, das vor etwa 55 Millionen Jahren begann und vor 34 Millionen Jahren endete. Damals begannen Urwale, fachlich Archaecoeti genannt, den Weg vom Land ins Meer. Auch aus dem folgenden Oligozän gibt es Funde, die zeigen, dass in jener Zeit die beiden heute lebenden Gruppen, die Bartenwale (Mysticeti) und die Zahnwale (Odontoceti) entstanden. Ergänzt durch Vergleiche der Erbsubstanz (DNA) heute lebender Säugetiere und speziell von Walen lässt sich nunmehr der Übergang vom Land- zum Meeressäugersäuger dokumentieren.

Etwa zur gleichen Zeit, da Simpson die Beziehung der Wale zu anderen Säugern auf der Basis anatomischer Befunde für unentwirrbar hielt, entstand ein neuer methodischer Ansatz: Antigen-Antikörper-Reaktionen zwischen Blutseren lebender Tierarten belegen eine Verwandtschaft, die umso größer ist, je stärker die Immunreaktion ausfällt. Alan Boyden von der Rutgers-Universität in New Brunswick (US-Bundesstaat New Jersey) und ein Kollege ermittelten mit diesem „Vaterschaftstest", dass Wale von allen lebenden Tieren den Paarhufern (Artiodactyla) am nächsten stehen. Zu dieser Ordnung gehören Kamele, Flusspferde, Schweine und Wiederkäuer. Doch im Detail blieben die Beziehungen unklar. Waren Wale im Grunde Paarhufer? Oder teilten sie mit diesen einen gemeinsamen Vorfahren?

In den 1960er Jahren entdeckte der Paläontologe Leigh van Valen, damals am Amerikanischen Museum für Naturgeschichte in New York, Indizien für die letztere Interpretation. Er untersuchte Fossilien einer Gruppe primitiver Huftiere, der Condylarthra (zu Deutsch Urhuftiere), und fand auffallende Ähnlichkeiten zwischen den dreihöckrigen Zähnen der wenigen bis dahin bekannten Urwale und denen einer Gruppe Fleisch fressender Condylarthren, den Mesonychiden. Andererseits fand er aber auch gemeinsame Zahnmerkmale zwischen Paarhufern und den Arctocyoniden, engen Verwandten der Mesonychiden. Van Valen schloss daraus, dass die Wale von Letzteren abstammen und über die Arctocyonidae mit den Paarhufern verbunden sind.

Es musste demnach einen Verzweigungspunkt im Stammbaum der Meeressäuger geben, doch etwa ein Jahrzehnt verging, bevor Paläontologen geeignete Fossilien ausgruben, um die Hypothese prüfen zu können. Allerdings erkannten sie die Bedeutung ihres Fundes zunächst nicht. Im Jahr 1977 suchte der Paläontologe Philip Gingerich von der Universität Michigan Landsäuger des Eozäns in Pakistan. Die Expedition verlief enttäuschend, denn zu Tage kamen nur diverse Meeresbewohner. Das war allerdings nicht erstaunlich, hatte das Tethys-Meer im Eozän doch zeitweise große Teile des heutigen indischen Subkontinents bedeckt. Unter Fisch- und Schneckenresten fanden die Wissenschaftler aber auch zwei Beckenteile, die offenbar von recht großen und durchaus lauffähigen Tieren stammten. Sie wussten damit jedoch nichts anzufangen, außer sich an der Vorstellung spazieren gehender Wale zu ergötzen.

GLOSSAR

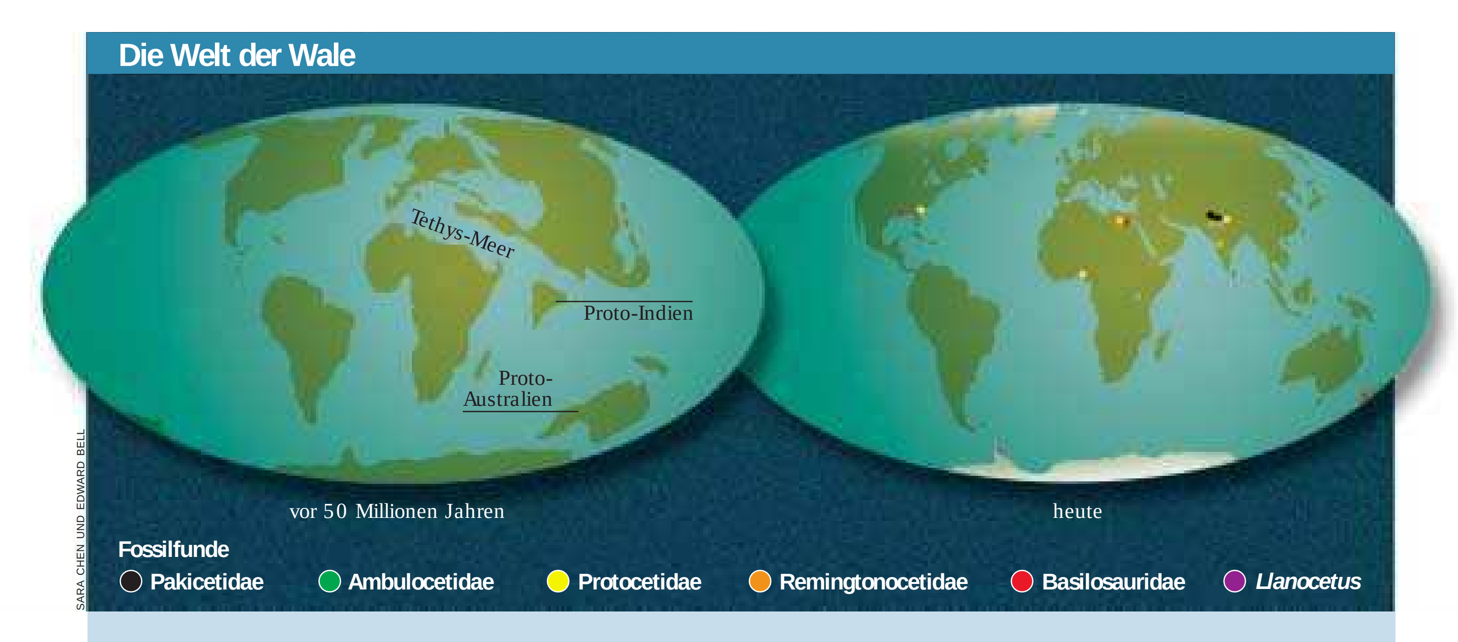
Cetaceae: eine Ordnung der Säugetiere, die alle heutigen Wale, Delfine und Tümmler sowie ihre ausgestorbenen Vorfahren umfasst. Die heutigen Arten werden in zwei Unterordnungen gegliedert: die Zahnwale (Odontoceti) schließen Pottwale, Pilotwale und Belugas ein sowie alle Delfine, Tümmler und Schwertwale, zu den Bartenwalen (Mysticeti) gehören Blau-, Finn-, Grau-, Buckel- und Seiwale sowie ihre Verwandten. Der Begriff „Wal" wird oft als Sammelbegriff für alle Cetaceae verwendet.

Mesonychidae: eine Familie ursprünglicher wolfsähnlicher Huftiere, die man lange Zeit als Vorfahren der Wale ansah.

Eozän: ein warmes Erdzeitalter, das vor 55 Millionen Jahren begann und vor 34 Millionen Jahren endete. In dieser Zeit begaben sich die Wale auf den Weg vom Land ins Meer.

Oligozän: das Erdzeitalter, das vor 34 Millionen Jahren begann und vor 24 Millionen Jahren endete. Die Meeresspiegel fielen, durch die Trennung von Australien und der Antarktis entstanden die zirkumpolaren Südströme, die Abkühlung brachten. Menge und Verteilung der Nährstoffe im Meer änderten sich, und die Wale erhielten neue ökologische Chancen. Damals entstanden Zahn- und Bartenwale.

Die Welt der Wale



Während des Eozäns bedeckte ein riesiges Meer, benannt nach der griechischen Göttin Tethys, das Gebiet von Spanien bis Indonesien. Die warmen Flachgewässer enthielten viele Nährstoffe und eine reichhaltige Fischfauna. Und die früheren Fischfänger, Plesiosaurier, Mosasaurier und andere große Meeresreptilien waren zusammen mit den Dinosauriern ausgestorben, wodurch Platz für neue Großräuber entstanden war (wenngleich Haie und Krokodile durchaus ernsthafte Konkurrenten darstellten). Rund 300 Millionen Jahre nachdem Wirbeltiere das Land erobert hatten, kehrten deshalb einige Säuger ins Meer zurück.

Das folgende Oligozän brachte kühlere Klimata. Der Paläontologe Ewan Fordyce von der Universität von Otago in Neuseeland zeichnet folgendes Bild für die Entwicklung der Zahn- und Bartenwale aus den Urwalen: *Llanocetus*, ein 34 Millionen Jahre alter Vor-Bartenwal aus der Antarktis, ist das älteste bekannt gewordene Bindeglied zu den modernen Walgruppen. Er könnte in den kalten Antarktisgewässern schon nach Art heutiger Bartenwale Krill gefischt haben. Etwa zur gleichen Zeit haben wahrscheinlich erste Zahnwale als Spezialisten für die Jagd in dunklen Meerestiefen die Echo-Ortung verwendet.

Leider gibt es nur wenige Fossilfunde aus dieser Frühzeit. Die niedrigen Meeresspiegel im mittleren Oligozän setzten viele, vielleicht walfossilienhaltige Sedimente des frühen Oligozäns Wind und Regen aus. Jüngere Skelette zeigen jedoch, dass sich die Barten- und Zahnwale schon vor etwa 30 Millionen Jahren in die meisten der heutigen Familien aufgespalten hatten.

Zwei Jahre später stieß Gingerich in den Ausläufen des Himalaya in Nordpakistan auf Teile eines fünfzig Millionen Jahre alten Schädels. Obwohl er den Fundumständen zufolge von einem Landsäuger stammen musste, zeigte seine Gehörregion typische Walmerkmale, lediglich die Anpassung zum Richtungshören im Wasser fehlte. Gingerich hatte das zu diesem Zeitpunkt älteste und ursprünglichste Fossil eines „Wals" gefunden, auch wenn das Tier offensichtlich ein gut Teil seines Lebens an Land verbracht hatte. Gingerich nannte es nach dem Fundort *Pakicetus*.

Ein anderes Paläontologenteam fand einen Teil des Unterkiefers und ein paar Zähne dieses Tieres, sodass die Beziehung zu den etwa zehn Millionen Jahre älteren Mesonychiden anhand der Zahnmerkmale scheinbar gut nachzuweisen war. Beide hatten in dieser Gegend gelebt, und die Abkunft der Wale von den wolfsartigen Räubern wurde immer wahrscheinlicher. Doch wie die Urwale vom Hals abwärts ausgesehen hatten, war noch völlig offen.

Die Politik legte der Forschung zunächst Steine in den Weg, um es milde auszudrücken: Nach der sowjetischen Besetzung Afghanistans erklärte Pakistan das Fundgebiet 1983 zur Sperrzone. Gingerich forschte in Ägypten weiter, 85 Meilen südwestlich von Kairo im so genannten Zeuglodon-Tal. Das Wüstengebiet trägt seinen Namen auf Grund von Funden aus den 1920er Jahren – damals nannte man die Urwale wissenschaftlich Zeuglodonta. Auch dieses Gebiet hatte im Eozän unter dem Meeresspiegel der Tethys gelegen, und Sandstein-Formationen bergen heute die Skelette der damaligen Meeresbewohner.

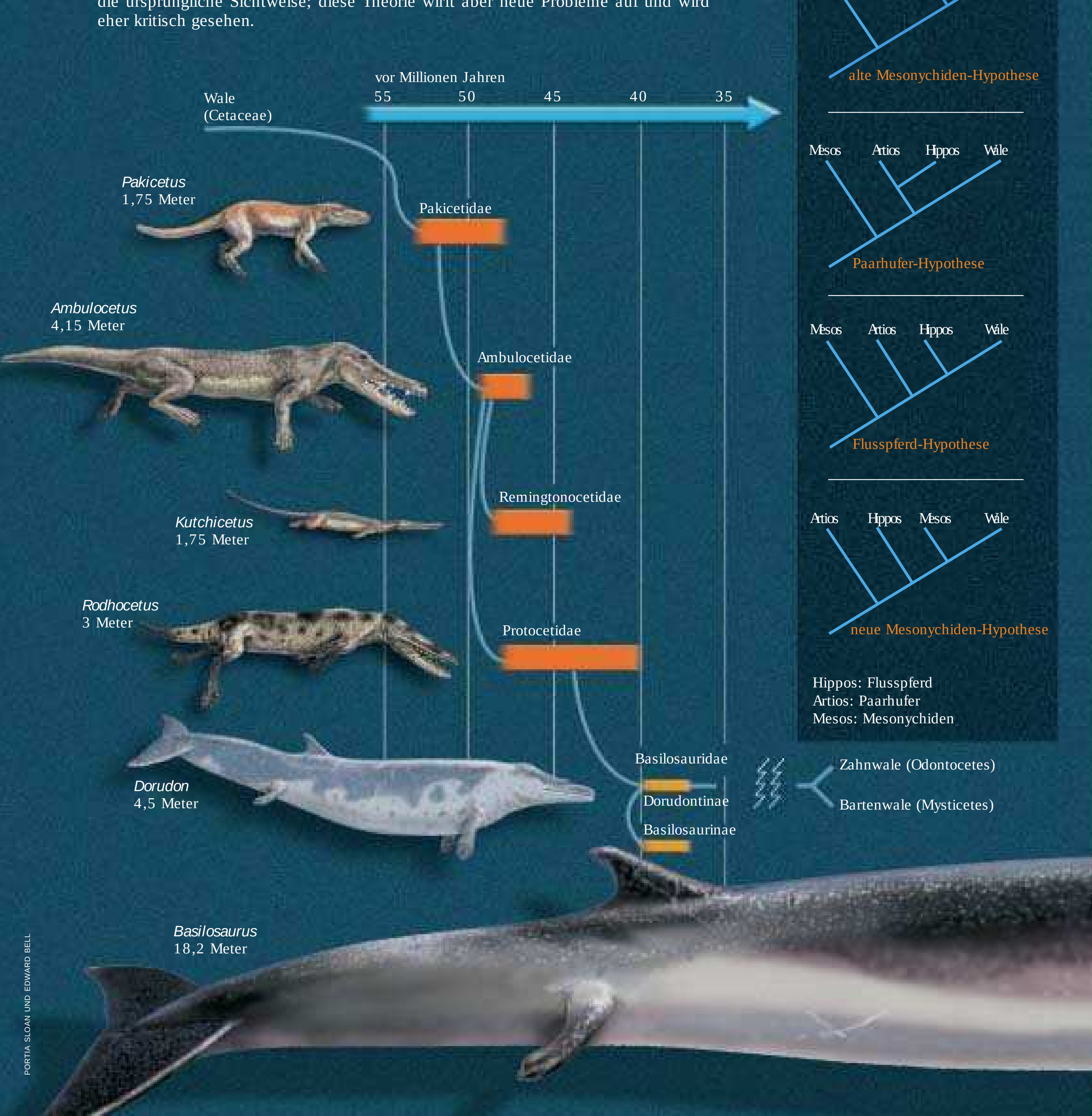
Schwierige Kopulation im Wasser

Nach mehreren Grabungskampagnen fanden Gingerich und seine Leute kleine Hinterbeine eines etwa zwanzig Meter langen Meeressäugers namens *Basilosaurus* – die ersten Reste von Walfüßen. Das Tier war der Wissenschaft aus früheren Funden durchaus schon bekannt. Vor 37 bis 40 Millionen Jahren hat es sich durch die Wellen geschlängelt. Doch ließ sich bislang nur ein Teil eines Oberschenkels rekonstruieren, und der galt dann als bereits weitgehend rückgebildet. Aber die Beine und Füße, die der Amerikaner nun vorstellte, waren zwar keinen halben Meter lang, aber doch so ausgeformt, dass sie offensichtlich noch eine Funktion gehabt haben müssen. Sicher taugten sie nicht zum Schwimmen oder für einen Landgang. Vielleicht dienten sie aber dazu, den massigen Körper bei der schwierigen Kopulation im Wasser zu steuern. Für den Wissenschaftler hatte der Fund noch eine andere Bedeutung. „Ich dachte mir sofort, wir sind hier zehn Millionen Jahre nach *Pakicetus*. Wenn diese Viecher immer noch Füße und Zehen trugen, haben wir zehn Millionen Jahre Geschichte zu erforschen", erinnerte sich Gingerich später. Und plötzlich erschienen die wandelnden Wale nicht mehr lächerlich.

Ein solches Tier entdeckte 1992 ein Team unter Leitung von J.G.M. (Hans) Thewissen vom Northeastern Ohio College of Medicine (Thewissen war ein ▶

Wal-Verwandtschaften

Wer denn nun als Vorfahr der Urwale gelten darf, ist nach wie vor nicht ganz geklärt. Die kleineren Verzweigungsdiagramme auf der rechten Seite geben die verschiedenen Hypothesen wieder. Der alten Mesonychiden-Theorie zufolge hätten diese wolfsähnlichen Säuger am Anfang der Wale gestanden, sie selbst ließen sich einen gemeinsamen Vorfahren mit den Paarhufern zurückführen. Vergleicht man bestimmte Skelettmerkmale, so kann man die Wale zu den Paarhufern zählen. DNA-Untersuchungen grenzen die Verwandtschaft weiter ein und lassen darauf schließen, dass die Wale den Flusspferden nahe stehen. Die so genannte neue Mesonychiden-Hypothese erklärt die ausgestorbenen Tiere zu Paarhufern und rettet damit wieder die ursprüngliche Sichtweise; diese Theorie wirft aber neue Probleme auf und wird eher kritisch gesehen.



PORTIA SLOAN UND EDWARD BELL

Was tranken die Urwale?

Süßwasser ist für Meeressäuger schwer zu bekommen. Seehunde und Seelöwen beziehen ihr Wasser großteils aus ihrer Fischnahrung, einige nehmen auch Schnee auf. Seekühe trinken regelmäßig in den Süßwasserbereichen der Flüsse. Wale hingegen decken ihren Wasserbedarf zum Teil aus der Nahrung, aber auch durch einen gelegentlichen Schluck Wasser. Wann entwickelten ihre Vorfahren die Fähigkeit, die damit verbundene Salzüberladung zu bewältigen? Hinweise geben die Verteilungen der Sauerstoff-Varianten ^{16}O und ^{18}O. Meerwasser enthält mehr von der schwereren, ^{18}O. Da Säugetiere aus dem getrunkenen Wasser Sauerstoff in ihre Zähne und Knochen einlagern, sollten sich die Fossilien derer, die Meerwasser aufnehmen, von denen der Süßwassertrinker unterscheiden.

Demnach dürften Pakicetiden, die ältesten bekannten Wale, Süßwasser getrunken haben, was mit anderen Befunden, wonach sie viel Zeit an Land verbrachten, übereinstimmt. Die *Ambulocetus*-Arten lebten schon im Meer, ihre Fossilien werden in marinen Sedimenten gefunden. Doch die Isotopenanalyse liefert kein klares Bild. Forscher glauben, dass die Tiere zum Trinken noch an Land gingen. Es wäre aber möglich, dass sie ihre Jugendjahre, in denen die Zähne mineralisieren, im Süßwasser verbrachten und erst später ins Meer gingen, wie dies auch etliche große Fische der Tropen heute tun. Die Protocetiden dagegen, deren Skelett stärker an das Wasserleben angepasst ist, zeigen auch in der Isotopenmessung reine Meerwasserwerte.

ehemaliger Student Gingerichs). In einer 48 Millionen Jahre alten Fels-Formation in Nordpakistan kam ein fast vollständiges Skelett zum Vorschein, das ein geradezu perfektes Missing Link zwischen modernen Walen und ihren landlebenden Vorfahren abgab. Große Füße und ein kräftiger Schwanz verrieten gute Schwimmkünste, hingegen belegten kräftige Beinknochen, bewegliche Ellenbogen- sowie Hand- und Fußwurzelgelenke eine Fähigkeit zum Landgang. Thewissen nannte das Tier *Ambulocetus natans*, den laufenden und schwimmenden Wal. Mittlerweile können Paläontologen den Übergang vom Landwal zum Meeresbewohner anhand einer Vielzahl von aufeinander folgenden Stadien gut dokumentieren.

Das entstehende Bild zeigt, wie *Ambulocetus* und seine Verwandtschaft, ihrerseits die Nachfahren der eher landlebenden Pakicetiden, den spitznasigen Remingtonocetiden Platz machten, aus denen wiederum die Protocetiden wurden – die ersten Wale, die hochseetüchtig genug waren, um von Indo-Pakistan über den Globus auszuschwärmen. Aus ihnen entstanden die Basilosauridae und die delfinartigen Dorudontidae, wahrscheinlich die Vorfahren moderner Wale (siehe Kasten links; wie allgemein bei ausgestorbenen Arten üblich, haben alle diese Tiere keine deutschen Namen).

Diese Erkenntnisse brachten dem Stammbaum der Wale neue Seitenzweige. Vor allem aber ließen sich nun einige der spektakulären anatomischen und physiologischen Änderungen nachvollziehen, die das dauerhafte Überleben im Meer ermöglichten.

Zum Beispiel hören Wale nicht über dünnhäutige Trommelfelle, sondern, dem dichteren Medium Wasser angepasst, mittels eines *Bulla* genannten Knochens, der bei Meeressäugern eine besonders hohe Dichte aufweist; er leitet dann den Schall zu tiefer liegenden Komponenten des Gehörs. Anstelle der Trommelfelle findet man bei den modernen Walen Tympanalligamente: Das sind dicke, seilartige Strukturen, die keinen Schall mehr leiten, wohl aber den äußeren Gehörgang verschließen und das Tier somit in die Lage versetzen, sehr tief zu tauchen.

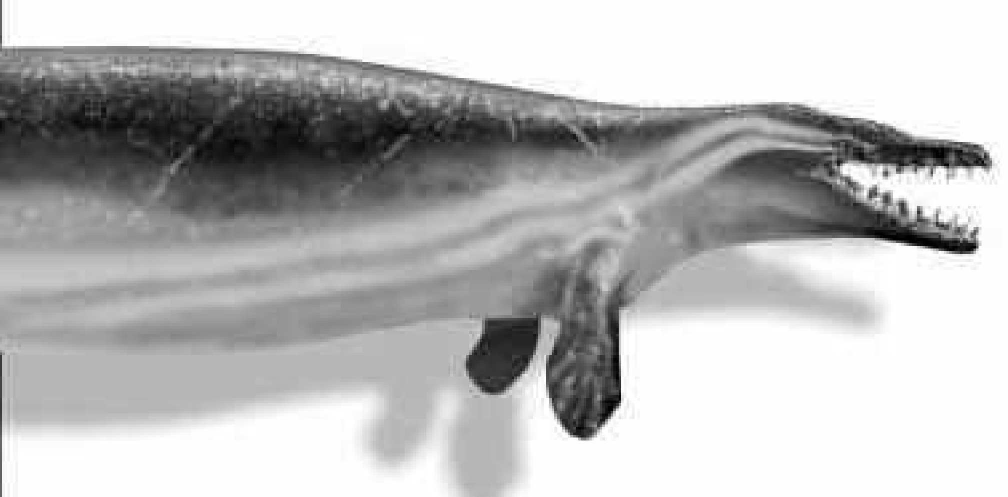
Auch *Pakicetus* verfügte bereits über verdickte *Bullae*, doch zu welchem Zweck? Thewissen vermutet, das Tier habe damit Vibrationen des Bodens wahrgenommen. Das passt gut zu neueren Funden des Bewegungsapparates – *Pakicetus* könnte ein Lauerjäger gewesen sein, der an flachen Flussufern Jagd auf trinkende Landtiere machte. Für seinen Nachfahren *Ambulocetus* ist laut Thewissen eine solche Lebensweise noch wahrscheinlicher, denn der Forscher entdeckte Ansätze zu einem Verbindungskanal zwischen Kiefer und Ohr. Wie heutige Krokodile könnte dieser „laufende Wal“ seinen Unterkiefer auf den Boden gelegt haben, um herannahende Beute zu erkennen. Diese Fähigkeit wäre dann eine so genannte Präadaptation, also eine nutzbare Voraussetzung, zum Hören im Wasser gewesen.

Zhexi Luo vom Carnegie Museum für Naturgeschichte in Pittsburgh (US-Bundesstaat Pennsylvania) fand heraus, dass die ersten wirklich wasserlebenden Wale, die Basilosauridae und Dorudontidae, bereits Tympanalligamente entwickelt hatten. Luftgefüllte Hohlräume, vergleichbar unseren Stirn- und Kieferhöhlen, sowie schwammartige Gewebe rund um das Mittelohr verbesserten das Auflösungsvermögen nach Frequenzen sowie das Richtungshören. Der Unterkiefer enthielt außerdem einen mit Fettgewebe gefüllten Kanal, der vermutlich Töne ans Mittelohr weiterleitete.

Wandernde Augen

Zu einem späteren Zeitpunkt in der Evolution des Gehörs der Meeressäuger entstanden Zahn- und Bartenwale. Die Ersteren beziehungsweise ihre Vorfahren vermochten immer besser, hochfrequente Töne wahrzunehmen und auch von sich zu geben. Das ermöglichte ihnen die Echo-Ortung bei der Jagd. Computertomogrammen der Gehörknochen von Fossilien zufolge besaßen schon die frühesten bekannten Zahnwale vor etwa 28 Millionen Jahren dafür geeignete Knochenstrukturen. Bartenwale hingegen erzeugten und empfingen immer tiefere Töne und vermochten so auf große Entfernungen mit Artgenossen zu kommunizieren. Der Ursprung dieser Fähigkeit liegt noch im Dunkeln, obwohl die bekannten Fossilien bis zu 34 Millionen Jahre zurückreichen.

Zu den bemerkenswerten Anpassungen an den Lebensraum Wasser gehören auch die Wanderungen von Augenhöhlen und Nasenöffnungen. Während die Au- ▶



gen von *Pakicetus* und *Ambulocetus* wie die von Krokodilen oben am Schädel liegen, wandern sie bei Protocetiden und nachfolgenden Walen auf die Seiten – offensichtlich jagten die Tiere vor allem unter Wasser, die Wasseroberfläche hatte an Bedeutung verloren. Die Nasenöffnungen wanderten im Laufe der Evolution nach hinten, von der Schnauzenspitze bei den Pakiceten zum höchsten Punkt des Kopfes, dort wo heute das Blasloch der Wale liegt.

Aus den komplexen vielhöckrigen Mahlzähnen der Landsäuger wurden die einfachen, spitzen Greifzähne der Zahnwale, die ihre Beute nur festhalten. Bartenwale tragen gar keine Zähne mehr, sondern kammartige Hornplatten, die vom Munddach herabhängend das Plankton aus dem Meerwasser filtern.

Besonders auffällig ist freilich die Anpassung der Körperform – aus Vierfüßlern wurden stromlinienförmige Schwimmer. *Ambulocetus* behielt noch seine beweglichen Schulter-, Ellenbogen-, Hand- und Fingergelenke, sein Becken war zudem massiv genug, den Körper an Land zu tragen. Doch mit seinen überdimensionalen Hinterbeinen und den Flossenfüßen muss er recht plump dahergewatschelt sein. Genau diese Merkmale aber brachten ihm in den fischreichen Flachmeerzonen der Tethys sicherlich gute Beute.

Die offene See erforderte weiter gehende Modifikationen. Als Erste zeigten sie die Protocetiden. Ein kürzlich ausgegrabenes Mitglied dieser Familie, *Rodhocetus balochistanensis*, hatte bereits abgeflachte Unterarmknochen, war also schon strömungsgünstiger geformt. Die feingliedrigen, verlängerten



ZEFA

Hände und Füße vermochten wahrscheinlich Schwimmhäute aufzuspannen. Auch sein Becken entsprach einem Leben im Wasser: Die sonst bei Säugern übliche Verschmelzung der untersten Wirbel war gelockert – kraftvolle Schwanzbewegungen mit Beteiligung des hinteren Rumpfbereiches gaben dem Tier Schub. Insgesamt dürfte *Rodhocetus* an der Wasseroberfläche auf Hundeart herumgepaddelt sein, unter Wasser hingegen eine Mischung aus otterartigen Hinterbeinbewegungen und kräftigen Schwanzschlägen benutzt haben. Wenn das Tier zur Fortpflanzung oder zum Sonnenbaden an Land ging, so glaubt Gingerich, robbte es vielleicht vorwärts wie ein heutiger Seehund.

Zu Zeiten der Basilosauriden und Dorudontiden lebten die Wale vollständig im Wasser. Wie ihre modernen Artgenossen hatten sie eine bewegliche Schulter, aber versteifte Ellenbogen- und Handgelenke – offensichtlich verfügten sie schon über die charakteristischen, Flipper genannten Seitenflossen zum Steuern und Balancehalten. Weiter hinten am Skelett trugen sie nur kleine Beinchen mit entsprechend verkleinertem Becken.

Eine Untersuchung der Wirbel von *Dorudon* durch Mark D. Uhen vom Cranbrook Institute of Science in Bloomfield Hills (US-Bundesstaat Michigan) ergab, dass einer ihrer Schwanzwirbel im Profil abgerundet war. Moderne Wale haben ebenfalls einen solchen Kugelwirbel an der Basis der Fluke, also der flachen, quer stehenden Schwanzflosse. Uhen vermutet deshalb, dass Basilosauriden und Dorudontiden schon Fluken hatten und durch Auf- und Ab- ▶



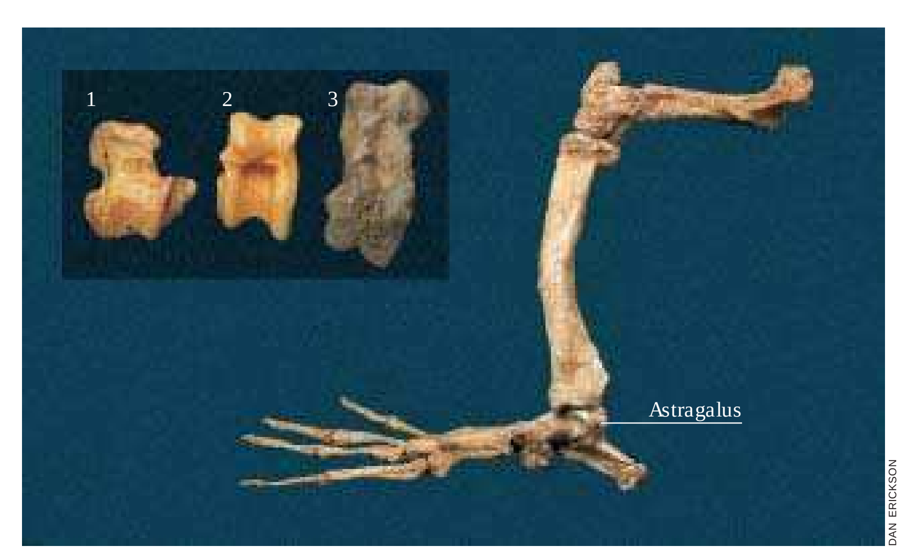
Die beeindruckende Wal-Fluke, die wie zum Abschied dem Fotografen winkt, ist eine fast vierzig Millionen Jahre alte Entwicklung. Ein Zeitreisender würde von einem Ausflug in die Antarktis vor gut 34 Millionen Jahren wohl ähnliche Fotos mit nach Hause bringen. Denn das älteste heute bekannte Fossil eines Bartenwals lässt vermuten, dass solche Tiere damals bereits auf der Jagd nach Krill, also Krebsen und anderen Kleinlebewesen, die antarktischen Meere durchstreiften.

schlagen des Schwanzes wie moderne Wale schwammen, eine energetisch sehr günstige Fortbewegungsart.

In welchem Zeitraum die Wale ihre Beine ganz verloren haben, wissen die Paläontologen noch nicht. Lawrence G. Barnes vom Museum für Naturgeschichte in Los Angeles (US-Bundesstaat Kalifornien) hat 1998 im Staat Washington ein Fossil eines etwa 27 Millionen Jahre alten Zahnwales gefunden, der noch recht gut entwickelte Hinterbeine hatte. Diejenigen moderner Wale sind von außen nicht mehr erkennbare Relikte, und ihr winziges Becken dient lediglich als Anker für einige kleinere Muskeln, die nicht mehr zur Fortbewegung beitragen.

Bis kurz vor dem Ende des 20. Jahrhunderts schien der weitere Weg der Wal-Paläontologie vorgezeichnet: Immer neue Fossilien würden immer mehr Details zu einer in wesentlichen Zügen endlich bekannten Stammesgeschichte liefern, die ihren Ursprung einstmals bei den Mesonychidae genommen hatte. Doch dann erschütterten genetische Tests in den USA, Frankreich und Japan das so sicher geglaubte Gedankengebäude. Anders als die immunologischen Untersuchungen aus den 1960er Jahren legten DNA-Vergleiche nahe: Wale sind nicht nur mit den Paarhufern näher verwandt als mit allen anderen Säugern – Wale sind Paarhufer. Kein Mesonychide stand am Anfang ihrer Entwicklung, sondern ein Urpaarhufer, vermutlich ein Urflusspferd.

Den Paläontologen schmeckte diese These gar nicht. Gingerich erinnert sich: „Ich dachte, die sind verrückt. Alles, was wir gefunden hatten, passte ins Bild des Mesonychiden-Ursprungs." Diese Tiere schienen zur rechten Zeit am richtigen Ort gewesen zu sein, während es kein Fossil gab, das als zeitlich, geografisch und morphologisch plausibler Paarhufer-Vorfahr für Wale herhalten konnte, von Flusspferden ganz zu schweigen. Auch Thewissen ignorierte die DNA-Ergebnisse bis 1999. In diesem Jahr publizierten Norihiro Okada und seine Kollegen am Tokyo Institute of Technology ihre DNA-Vergleiche. Die Forscher hatten dafür so genannte Sines (*short interspersed elements*) verwendet. Diese kurzen Zwischenstücke im Erbgut tragen vermutlich keine Information für irgendein körperliches Merkmal. Derart überflüssig für das Überleben unterliegen sie offenbar keiner natürlichen Auslese und lassen deshalb besonders sichere Rückschlüsse auf Verwandtschaften zu. Und die Sines sprachen ebenfalls für die Variante: Wale sind schlichtweg schwimmende Paarhufer.



Das Hinterbein eines *Rodhocetus* lieferte den Paläontologen endlich den langerwarteten Knochen namens Astragalus, das Rollbein (3). Neben dem Rollbein eines Mesonychiden (1) und dem eines modernen Paarhufers (2) zeigt es die charakteristische Doppel-Seilrolle aller Paarhufer-Rollbeine. Dies unterstützt die These, Wale stammen nicht von Mesonychiden, sondern von Paarhufern ab.



UNIVERSITY OF MICHIGAN EXHIBIT MUSEUM OF NATURAL HISTORY

***Dorudon*, ein 4,5 Meter langer delfinartiger Urwal, durchschwamm vor etwa 37 bis 40 Millionen Jahren die Ozeane.**

Es gab nur einen Weg, die Kontroverse zu lösen: Hätten die Molekularbiologen Recht, müssten Urwale ein besonders geformtes „Rollbein" gehabt haben. Dieser Astragalus genannte Knochen in der Fußwurzel wird für die Auf- und Abrollbewegung des Fußes gegen den Unterschenkel benötigt. Beim Paarhufer trägt er zwei charakteristische seilrollenartige Gruben auf der Gelenkfläche. Die eine hat Kontakt zum Schienbein, die andere zu weiteren Fußwurzelknochen.

Ururenkel der Urflusspferde

Letzten Herbst fiel dann tatsächlich dieses letzte Puzzlestück an seinen Platz. Gingerichs Team fand in Ost-Baluchistan ein teilweise zusammenhängendes Skelett von *Rodhocetus balochistanensis* und eine neue Gattung der Protocetiden namens *Artiocetus*. Sein Schüler Thewissen entdeckte mit seinen Leuten in einer Knochenansammlung in den Kala-Chitta-Bergen im Pandschab (Pakistan) den größten Teil des lang gesuchten Skeletts von *Pakicetus* und noch ein kleineres Mitglied dieser Familie, *Ichthyolestes*. Das Besondere: Jeder dieser Funde hatte ein Rollbein der fraglichen Form.

Beide Wissenschaftler sind nun ebenfalls davon überzeugt, dass die Wale nicht von Mesonychiden abstammen. Gingerich hat sogar die Flusspferd-Idee übernommen. Auch wenn diese Tiere stammesgeschichtlich viel jünger sind als Wale, hatten sie doch Vorfahren im Eozän. Es waren hunde- bis pferdegroße Sumpfbewohner, die Anthracotheria. Deren Hand- und Handgelenksaufbau hat laut Gingerich einige Gemeinsamkeiten mit dem von *Rodhocetus*, und zwar Eigenheiten, die kein moderner Paarhufer aufweist. Beide könnten sehr wohl einen gemeinsamen Vorfahren mit den Walen haben. Auch Thewissen räumt mittlerweile ein, dass die Flusspferd-Hypothese heute mehr für sich hat als

Der lange Weg zurück ins Meer

Auf dem Weg zu den heutigen Zahn- und Bartenwalen musste die Anatomie in nur 15 Millionen Jahren allerlei Anpassungen an die aquatische Lebensweise vollziehen, wie die Skelettrekonstruktionen zeigen (angenommene, nicht als Fossil gefundene Knochen lavendelfarben). Vor allem schrumpften die Hinterbeine, die Vorderbeine wurden zu Flossen und die Wirbelsäule erhielt einen anderen Bau, um das kraftvolle Schwanzschlagen zum Antrieb zu ermöglichen. Umkonstruktionen am Schädel ermöglichten Unterwasserhören, die Nasenöffnung wanderte auf den Schädel, und die Zähne wurden zu einfachen Stiftchen. Später in der Stammesgeschichte der Wale verloren die Bartenwale die Zähne und bildeten Barten aus Horn als Seih-Apparat.

Pakicetus

Ambulocetus

heutiger Bartenwal

Rodhocetus

heutiger Zahnwal

Dorudon

PORTIA SLOAN

früher. Er ist jedoch noch vorsichtig. Die Eigenheiten des Körperbaus deuten seines Erachtens noch nicht trennscharf auf eine bestimmte Paarhufergruppe als nächste Verwandte.

Im Lichte dieser neuen Befunde dürften die Gemeinsamkeiten von Walen und Mesonychidae wohl ein Ausdruck von Konvergenz sein, also von Anpassungen an ähnliche Lebensweisen. Letztere waren, anders als die Meeressäuger, vermutlich eine Sackgasse der Evolution. Allerdings glauben noch nicht alle Fachleute daran. Maureen O'Leary von der State University of New York in Stony Brook warnt, dass bis zur gemeinsamen Bewertung aller morphologischen und molekularen Befunde die Mesonychidae noch den Platz an der Stammbaum-Basis beanspruchen können. Es sei auch vorstellbar, dass sie als ursprüngliche Paarhufer die Entwicklungstendenz im Bereich des Fußgelenks umgekehrt hätten. Dann wären sie immer noch die allernächsten Verwandten der Wale, Flusspferde hingegen lediglich die nächsten lebenden. Ihre Kritiker konstatieren, dass die Einbeziehung der Mesonychiden in die Paarhufer zwar einen Notausstieg für die Anhänger der älteren Hypothese schaffe, dafür aber die lang akzeptierte Vorstellung geopfert werden müsse, dass ein Paarhufer durch sein Rollbein gekennzeichnet sei.

Die genaue Beziehung zwischen Walen und Paarhufern wird wohl nur durch weitere Fossilfunde geklärt werden können, besonders solche, die deren Anfang allgemein und speziell den der Flusspferde aufhellen könnten. Wenn auch der letzte Ursprung damit noch unklar ist, gibt es inzwischen detaillierte Vorstellungen über die weitere Entwicklung der Meeressäuger bis zum Ende der Urwale. Wie aus diesen Barten- und Zahnwale wurden und wann ihre modernen Merkmale auftraten, ist ein weiteres Rätsel um die Wale. ■



Kate Wong *ist Redakteurin bei Scientific American.*

Literaturhinweise

Wale und Delphine. Von Anthony R. Martin. Mosaik Verlag, 1991.

Origin of Whales from Early Artiodactyls: Hands and Feet of Eocene Protocetidae from Pakistan. Von P. D. Gingerich et al. in: Science, Heft 293, S. 2239, 21.9.2001.

Skeletons of Terrestrial Cetaceans and the Relationship of Whales to Artiodactyls. Von J. G. M. Thewissen et al. in: Nature, Heft 413, S. 277, 20.9.2001.

The Emergence of Whales: Evolutionary Patterns in the Origin of Cetacea. Von J. G. M. Thewissen (Hg.), Plenum, 1998.

Aufbruch zum Pluto

Eine Raumsonde soll den fernsten Planeten besuchen und anschließend in den Kuiper-Gürtel weiterfliegen, um den weitgehend unerforschten Rand unseres Sonnensystems zu erkunden.

EDWIN FAUGHN



Bislang können Astronomen nur mutmaßen, dass Plutos Oberfläche aus Stickstoff, Kohlenmonoxid, Methan und Wassereis besteht. Wenn sich der Planet der Sonne nähert, sublimiert vermutlich ein Teil dieser Substanzen und bildet eine dünne Atmosphäre. Dabei können Geysire ausbrechen. Am Himmel über Pluto sind die ferne Sonne (links) und der Trabant Charon zu erkennen.

Von S. Alan Stern

Noch vor etwa zehn Jahren betrachteten die meisten Astronomen den Planeten Pluto als buchstäblichen Außenseiter in unserem Sonnensystem. Der Sonne am nächsten sind die vier kleinen Gesteinsplaneten Merkur, Venus, Erde und Mars. Viel weiter außen kreisen die vier Gasriesen Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun. Getrennt werden diese beiden Bereiche durch den Asteroiden-Gürtel, in dem unzählige Kleinplaneten die Sonne umrunden. Die symmetrisch um diese Zone gruppierten acht Planeten bewegen sich im selben Umlaufsinn auf nahezu kreisförmigen Bahnen, die nur wenig zur Ebene der Erdbahn, der Ekliptik, geneigt sind. Pluto aber passt mit seiner exzentrischen und zur Ekliptik stärker geneigten Umlaufbahn nicht in dieses Schema. Er erschien den Planetologen als seltsamer Einzelgänger am eisigen Rand unserer kosmischen Heimat.

Einige Wissenschaftler, insbesondere der holländisch-amerikanische Astronom Gerard Kuiper, meinten aber schon in den 40er und 50er Jahren des 20. Jahrhunderts, Pluto sei eventuell gar kein Einzelgänger, sondern eher das hellste eines großen Ensembles von Objekten jenseits der Neptun-Bahn, deren Umlaufbahnen zur Ekliptik mehr oder weniger stark geneigt seien. Später bezeichneten die Planetologen dieses hypothetische Reservoir als Kuiper-Gürtel und spekulierten über dessen Eigenschaften. Doch jahrzehntelang schlugen alle Versuche fehl, die Myriaden eisiger Objekte tatsächlich zu beobachten.

In den späten 80er Jahren erkannten die Wissenschaftler im Kuiper-Gürtel eine mögliche Quelle für Kometen. Zwar schienen die meisten dieser Schweifsterne aus einer bereits 1950 vom holländischen Astronomen Jan Hendrik Oort postulierten, weit ausgedehnten sphärischen Wolke zu stammen. Aber als man die bis dahin bekannten Kometen nach ihrer Umlaufzeit um die Sonne sortierte, trat ein zweites Herkunftsgebiet zutage. Während die Bahnneigungen der langperiodischen Kometen völlig zufällig verteilt sind, weisen viele kurzperiodische Kometen nur geringe Bahnneigungen zur Ekliptik auf. Somit schien es zusätzlich ein ringförmiges Kometenreservoir zwischen der Neptun-Bahn und der Oort'schen Wolke zu geben, das sich bequem mit dem Kuiper-Gürtel gleichsetzen ließ.

Dieser Hinweis trieb die Astronomen zurück an die Fernrohre: Erneut begann die Suche nach leuchtschwachen Objekten jenseits des Neptuns. Inzwischen gab es elektronische Detektoren, welche die Suche erheblich empfindlicher machten als früher – und so ließ der Erfolg diesmal nicht lange auf sich warten.

Jenseits des Horizonts

Im Jahre 1992 entdeckten Astronomen am Mauna-Kea-Observatorium auf Hawaii das erste Kuiper-Gürtel-Objekt. Es war nur ein Zehntausendstel so hell wie Pluto, und mit schätzungsweise 240 Kilometern Durchmesser ist es nur ein Zehntel so groß (siehe „Der Kuiper-Gürtel", Spektrum der Wissenschaft 7/1996, S. 56). In der Folgezeit vermochten die Beobachter über 600 weitere Himmelskörper im Kuiper-Gürtel aufzuspüren. Ihre Durchmesser haben Werte zwischen 50 und 1200 Kilometern.

Das ist aber sozusagen nur die Spitze des Eisbergs. Denn bisher haben die Astronomen nur einen kleinen Bereich des Himmels durchmustert. Extrapoliert man die Zahl der dort aufgefundenen Objekte auf die gesamte Sphäre, so müsste es etwa 100 000 Objekte im Kuiper-Gürtel geben, die größer sind als 100 Kilometer. Der Kuiper-Gürtel stellt sich somit als vergrößertes Abbild des Asteroiden-Gürtels heraus: Er enthält mehr Masse und mehr Objekte (insbesondere mehr große Objekte). Was dem Kuiper-Gürtel zudem enorme wissenschaftliche Bedeutung verleiht, ist sein Aufbau aus Materie, die sich seit der Entstehungsphase unseres Sonnensystems kaum verändert hat.

Pluto ist demnach keine Ausnahmeerscheinung. Zusammen mit seinem Mond Charon gehört er vielmehr zu einem Schwarm kleinerer Himmelskörper, die in einem Abstand von fünf bis acht Milliarden Kilometern um die Sonne kreisen. Diese ferne Region enthält vermutlich wichtige Hinweise auf die frühe Entwicklung unseres Sonnensystems – deshalb sind die Astronomen sehr daran interessiert, mehr über Pluto und Charon sowie über die anderen Objekte des Kuiper-Gürtels zu erfahren. Allerdings schränkt die große Entfernung zwischen dieser Region und der Erde die Qualität der Beobachtungen ein. Selbst das Hubble-Weltraumteleskop zeigt auf der Oberfläche Plutos nur verschwommene helle und dunkle Regionen. Und während die Raumsonden Pioneer, Voyager und Galileo wundervolle Nahaufnahmen von Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun geliefert haben, hat bislang kein Raumfahrzeug das Pluto-Charon-System oder den Kuiper-Gürtel besucht.

Angesichts der Bedeutung dieser Region für unser Verständnis vom Aufbau und von der Entstehung des Sonnensystems haben Wissenschaftler die amerikanische Luft- und Raumfahrtbehörde Nasa seit über einem Jahrzehnt gedrängt, Pluto als Ziel in ihr Planetenforschungsprogramm aufzunehmen. Die Nasa hat eine Vielzahl von Konzepten untersucht, von busgroßen, mit unterschiedlichsten Instrumenten beladenen Raumgefährten ähnlich der Cassini-Sonde bis zu Minisonden in Hamstergröße, die lediglich eine Kamera tragen. Ende der 90er Jahre schließlich einigte man sich auf ein Konzept mittlerer Größe namens Pluto-Kuiper-Express. Das Jet Propulsion Laboratory im kalifornischen Pasadena sollte die Sonde bauen. Doch die veranschlagten Kosten kletterten rasch auf 800 Millionen Dollar. Weil die Nasa nicht so viel investieren mochte, kam schließlich im Herbst 2000 das Aus für den Pluto-Kuiper-Express.

Aber dieser Entschluss blieb nicht ohne Widerspruch. Wissenschaftler, Weltraum-Enthusiasten und sogar Schulkinder baten die Nasa, die Streichung zu überdenken – was tatsächlich geschah. Doch anstatt die Arbeit am teuren Pluto-Kuiper-Express wieder aufzunehmen, schrieb die Raumfahrtbehörde einen Wettbewerb für Universitäten, Forschungslabors und Raumfahrtunterneh-

IN KÜRZE

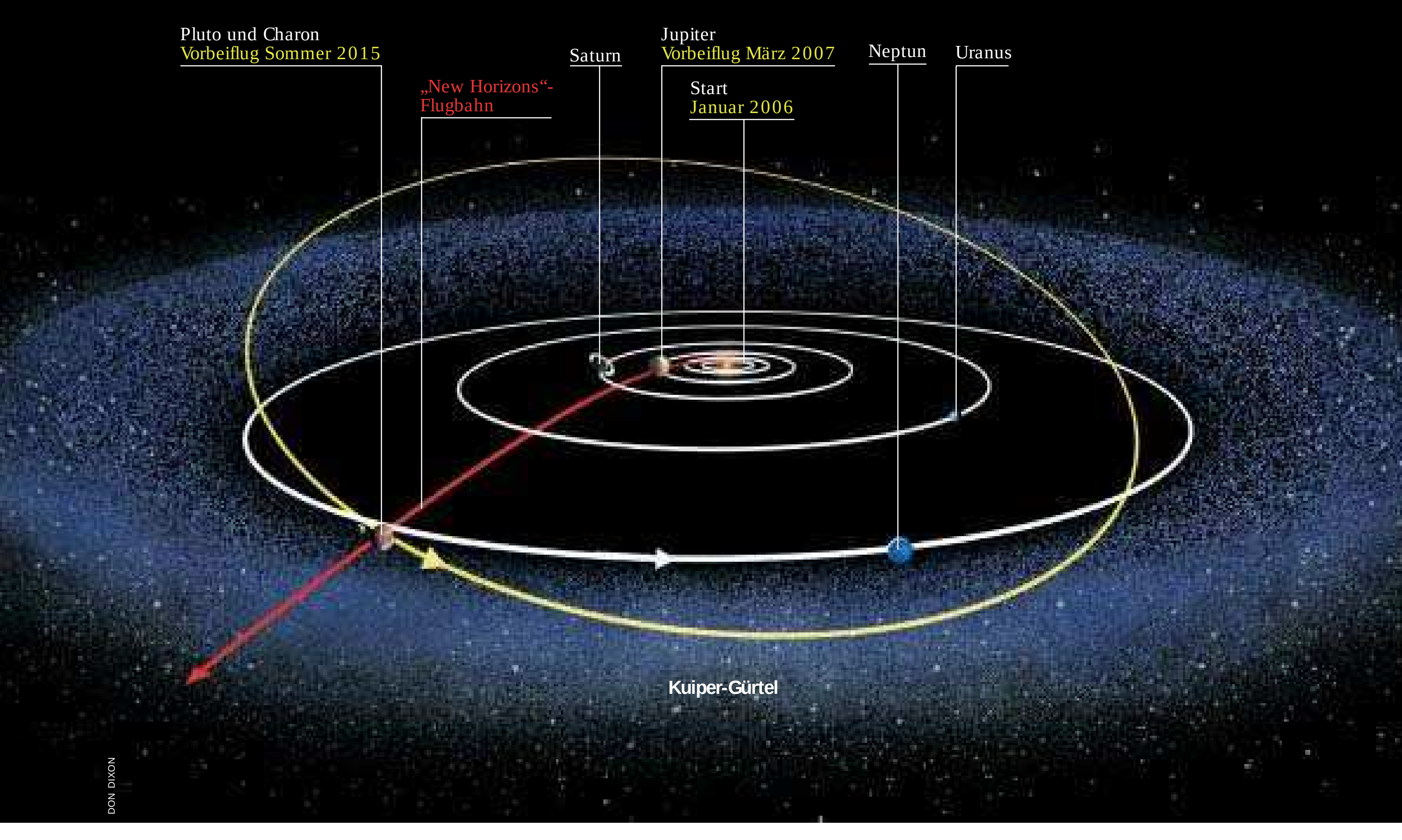
➤ Die Astronomen haben in den vergangenen Jahren gelernt, dass Pluto kein Ausnahme-Objekt, sondern der hellste einer großen Klasse von Himmelskörpern ist, die in einer fernen Region namens Kuiper-Gürtel um die Sonne kreisen. Die Wissenschaftler wollen den Pluto und diese Region des Sonnensystems erforschen, weil sie überaus wichtige Informationen zur frühen Geschichte der Planeten enthalten.

➤ Pluto und sein Mond Charon sind aber auch für sich selbst genommen interessante Objekte. Das Größenverhältnis der beiden Himmelskörper legt es nahe, von einem Doppel-Planeten zu sprechen. Außerdem verfügt Pluto über eine Atmosphäre mit einer hohen Entweichrate und mit komplexen jahreszeitlichen Veränderungen.

➤ Die Nasa hat ein Team namens „New Horizons" ausgewählt, eine Raumsonde zu bauen, die Pluto, Charon und mehrere Objekte im Kuiper-Gürtel erforschen soll. Die Sonde soll 2006 starten und schon 2015 den Pluto erreichen.

Ziel: äußeres Sonnensystem

Die Reise zum Pluto könnte weniger als zehn Jahre dauern, wenn die Sonde „New Horizons“ 2006 startet. Auf ihrem Flug entlang der geplanten Bahn (rote Kurve) begegnet die Sonde zunächst dem Jupiter, in dessen Schwerefeld sie Schwung für die weitere Reise zum Pluto holt (gelbe Umlaufbahn). Nach der Erforschung von Jupiter 2007 und dem Pluto-Charon-System 2015 besucht „New Horizons“ noch einige weitere der eisigen Himmelskörper des Kuiper-Gürtels.

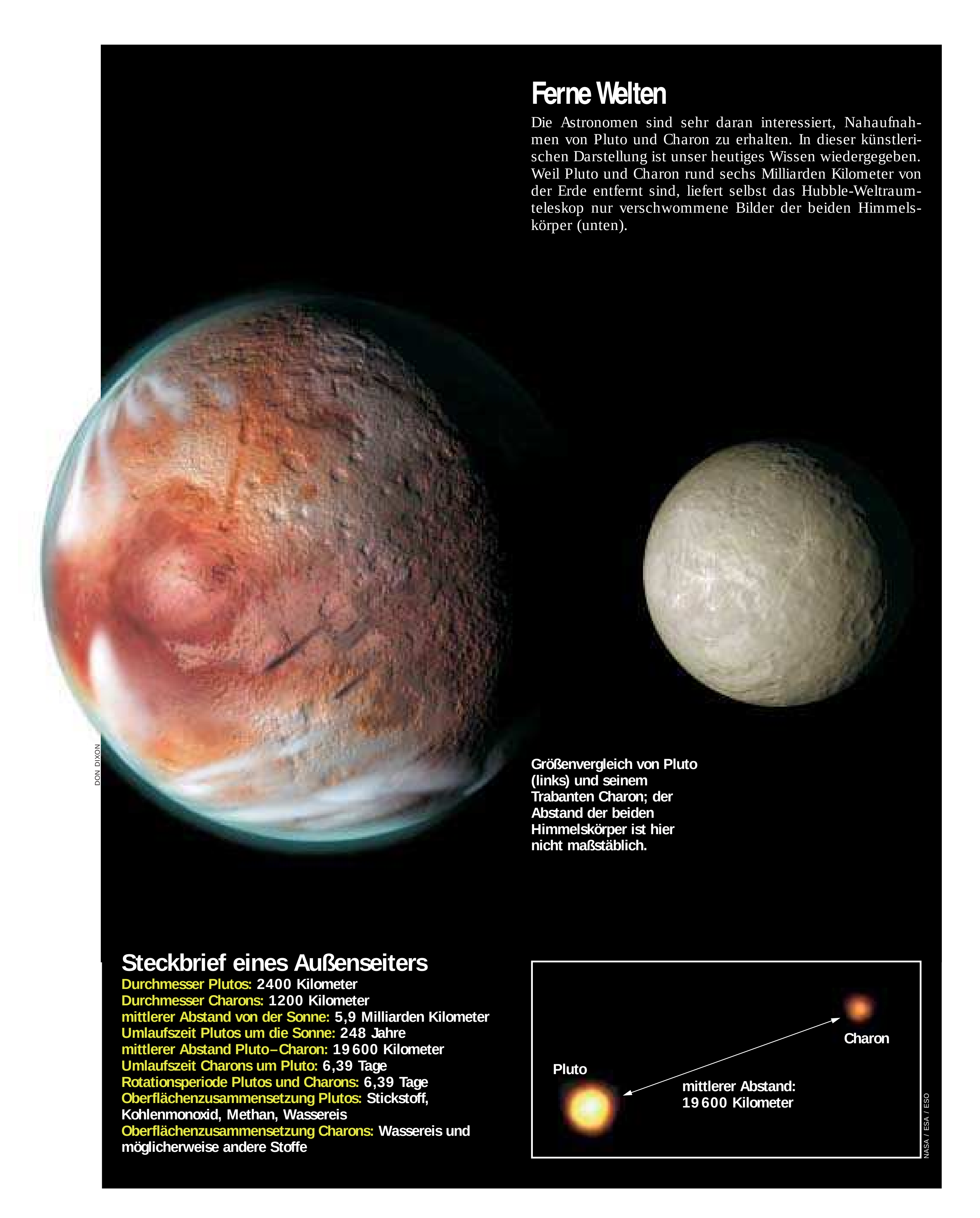


men aus: Gesucht wurde ein wissenschaftlich sinnvoller und zugleich kostengünstiger Vorschlag zur Erforschung von Pluto, Charon und dem Kuiper-Gürtel. Niemals zuvor hatte die Nasa Universitäten und Industrie zu einem Wettbewerb um die Leitung einer interplanetaren Mission aufgefordert. Allerdings ließ sich die Behörde ein Hintertürchen offen: Sollte keiner der Vorschläge die wissenschaftlichen Anforderungen erfüllen und unter der festgelegten Kostengrenze von 500 Millionen Dollar bleiben, dann würde sich die Nasa nicht verpflichtet fühlen, überhaupt einen der Vorschläge auszuwählen.

Im November 2001, nach einem für die Wettbewerber qualvollen Auswahlprozess, wählte die Nasa unser „New Horizons“-Team aus, das sich aus Wissenschaftlern von einem Dutzend Universitäten, Forschungsinstitutionen und Nasa-Zentren zusammensetzt. Das Southwest Research Institute in San Antonio (Texas), dem ich angehöre, managt das Gesamtprojekt und ist verantwortlich für das Missionsteam und die wissenschaftlichen Instrumente. Das Labor für Angewandte Physik der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore baut und betreibt die Sonde. Deren Komponenten liefern die Firma Ball Aerospace, das Goddard-Raumfahrtzentrum der Nasa und die Stanford-Universität. Die Navigation und die Bahnverfolgung schließlich liegen in den Händen des Jet Propulsion Laboratory.

„New Horizons“ erfüllte die Bedingungen der Nasa mit Hilfe neuer Konzepte: Die Mission, die bereits im Sommer 2015 den Pluto erreichen könnte, würde 488 Millionen Dollar kosten, inklusive einer Budget-Reserve von 80 Millionen Dollar. Es sind sogar mehr Instrumente vorgesehen als beim abgelehnten Pluto-Kuiper-Express – und das für weniger Geld und eine rund zehnfache Datenmenge.

Doch noch ist „New Horizons“ nicht gesichert. Im Februar strich US-Präsident George W. Bush 122 Millionen Dollar, die für die Mission vorgesehen waren, aus dem Nasa-Budget für 2003. Doch meine Kollegen und ich sind optimistisch, dass der Kongress, der die Nasa zur Planung einer Mission zu Pluto und zum Kuiper-Gürtel aufgefordert hatte, die finanziellen Mittel zum Bau der ▶



Ferne Welten

Die Astronomen sind sehr daran interessiert, Nahaufnahmen von Pluto und Charon zu erhalten. In dieser künstlerischen Darstellung ist unser heutiges Wissen wiedergegeben. Weil Pluto und Charon rund sechs Milliarden Kilometer von der Erde entfernt sind, liefert selbst das Hubble-Weltraumteleskop nur verschwommene Bilder der beiden Himmelskörper (unten).

Größenvergleich von Pluto (links) und seinem Trabanten Charon; der Abstand der beiden Himmelskörper ist hier nicht maßstäblich.

Steckbrief eines Außenseiters

Durchmesser Plutos: 2400 Kilometer
Durchmesser Charons: 1200 Kilometer
mittlerer Abstand von der Sonne: 5,9 Milliarden Kilometer
Umlaufszeit Plutos um die Sonne: 248 Jahre
mittlerer Abstand Pluto–Charon: 19600 Kilometer
Umlaufszeit Charons um Pluto: 6,39 Tage
Rotationsperiode Plutos und Charons: 6,39 Tage
Oberflächenzusammensetzung Plutos: Stickstoff, Kohlenmonoxid, Methan, Wassereis
Oberflächenzusammensetzung Charons: Wassereis und möglicherweise andere Stoffe

Sonde wieder freigeben wird. „New Horizons“ wäre weit mehr als die erste Mission zum Pluto. Während ihres Fluges würde die Sonde auch den Jupiter und seine Monde studieren – und nach dem Vorbeiflug an Pluto und Charon stünde die Begegnung mit mehreren Kuiper-Gürtel-Objekten auf dem Programm.

Die Außenbezirke unseres Sonnensystems sind aus verschiedenen Gründen von Interesse. Zunächst einmal scheint der Kuiper-Gürtel in Größe, Form und allgemeinem Aufbau den Gürteln aus festen Körpern zu ähneln, die manche unserer Nachbarsterne umgeben wie etwa Wega und Fomalhaut. Einige meiner Kollegen und ich haben mittels Computersimulationen nachzuvollziehen versucht, wie die Kuiper-Gürtel-Objekte vor fast fünf Milliarden Jahren aus der wirbelnden Gas- und Staubscheibe des jungen Sonnensystems entstanden sind. Demnach muss der Kuiper-Gürtel ursprünglich hundertmal mehr Masse enthalten haben als heute, um Pluto, Charon und die neu entdeckten Himmelskörper hervorzubringen. Mit anderen Worten: Damals war dort genug Materie vorhanden, um einen weiteren Planeten von der Größe des Uranus oder des Neptuns zu bilden.

Die Simulationen zeigen sogar, dass nur eine äußere gravitative Störung eine schnelle Bildung großer Planeten im Kuiper-Gürtel verhindern konnte. Diese Störung müsste etwa zu jener Zeit gewirkt haben, als Pluto entstand. Der Nachbarplanet Neptun, der sich am inneren Rand des Gürtels gebildet hatte, könnte die Störung verursacht haben. Hat also dessen Schwerkraft die Entstehung eines weiteren Gasriesen weiter außen verhindert? Wenn ja, warum hat dann der Uranus die Bildung des Planeten Neptun nicht auf die gleiche Weise unterbunden?

Archäologie im All

Auch eine Vielzahl kleinerer Himmelskörper könnte die Störungen hervorgerufen haben. Vorstufen der Planetenbildung waren Tausende von Kilometern große Felsbrocken, die sich aus dem in der zirkumsolaren Gasscheibe vorhandenen Staub zusammengeballt hatten. Uranus und Neptun könnten nach ihrer Bildung einige dieser protoplanetaren Brocken aus ihren Entstehungsregionen herausgeschleudert haben, sodass diese mit hoher Geschwindigkeit durch den Kuiper-Gürtel rasten. Was auch immer die Ursache war: Der Kuiper-Gürtel verlor jedenfalls den größten Teil seiner Masse, und somit konnten die darin verbliebenen Himmelskörper nicht weiter wachsen.

Die Kuiper-Gürtel-Objekte sind demnach Überbleibsel jener Phase der Planetenentstehung und enthalten deshalb wertvolle Hinweise auf die Bildung des äußeren Sonnensystems. Die Erforschung von Pluto und dem Kuiper-Gürtel entspricht also einer archäologischen Grabung tief in die längst vergangene Geschichte des äußeren Sonnensystems.

Ferner stellen Pluto und Charon für die Planetenforscher eine Art wissenschaftliches Wunderland dar. So ist der Trabant Charon überraschend groß – mit einem Durchmesser von 1200 Kilometern ist er etwa halb so groß wie Pluto. Die beiden Himmelskörper ähneln also mehr einem Doppel-Planeten als einem Planet-Mond-System. Kein anderer Planet in unserem Sonnensystem hat einen vergleichbar großen Mond – die meisten Trabanten erreichen nur wenige Prozent des Durchmessers ihres Zentralkörpers. Da die Astronomen in den letzten Jahren aber viele Doppel-Asteroiden und Doppel-Kuiper-Gürtel-Objekte entdeckt haben, gibt es kaum Zweifel daran, dass solche Objekte in unserem Sonnensystem – und vermutlich auch in extrasolaren Planetensystemen – überaus häufig vorkommen. Freilich haben wir noch nie eine Doppelwelt aus der Nähe untersucht.

Wir würden sehr gern in Erfahrung bringen, wie das Doppelsystem Pluto–Charon entstanden ist. Die gängige Theorie besagt, dass Pluto in ferner Vergangenheit mit einem anderen großen Himmelskörper kollidierte. Ein Großteil der Trümmer hat sich danach in einer Umlaufbahn um Pluto gesammelt und sich schließlich zu dem heutigen Trabanten zusammengeballt. Da der Erdmond vermutlich auf ähnliche Weise entstanden ist, könnte die Untersuchung von Pluto und Charon uns auch neue Informationen über unsere irdische Heimat liefern.

Außerdem interessiert es die Forscher, warum Pluto und Charon so unterschiedlich aussehen. Beobachtungen von der Erde aus und mit dem Hubble-Weltraumteleskop zeigen, dass Pluto eine stark reflektierende Oberfläche mit auffälligen, ausgedehnten Polkappen besitzt. Charon hingegen reflektiert wesentlich weniger Licht und zeigt keine auffälligen Oberflächenmerkmale. Und während Pluto über eine Atmosphäre verfügt, hat Charon offenbar keine. Haben diese deutlichen Differenzen zwischen den beiden Himmelskörpern ihre Ursache in einer unterschiedlichen Entwicklung, vielleicht auf Grund ihrer unterschiedlichen Größe und Zusammensetzung? Oder sind die Unterschiede eine Konsequenz des Entstehungsvorgangs? Wir wissen es nicht.

Plutos Dichte und Größe sowie die chemische Zusammensetzung seiner Oberfläche ähneln bemerkenswert deutlich den Werten von Triton, dem größten Neptun-Mond. Eine der großen Überraschungen der Voyager-2-Beobachtungen des Neptun-Systems war die Entdeckung von aktivem Vulkanismus auf Triton. Werden wir auf Pluto eine ähnliche Aktivität entdecken? Oder gar auf den Kuiper-Gürtel-Objekten? Nach heutigem Wissensstand ist das eher unwahrscheinlich – aber die Aktivität von Triton kam ebenfalls völlig unerwartet. Vielleicht zeigt uns der Neptun-Trabant Triton, dass wir den Aufbau der kleinen Welten im Sonnensystem noch nicht verstehen. Mit der Erforschung von Pluto und den Kuiper-Gürtel-Objekten werden wir sicherlich ein besseres Verständnis dieser faszinierenden Klasse von Himmelskörpern gewinnen.

Pluto erlaubt Einblicke in die Frühgeschichte der Erde

Eine weitere reizvolle Besonderheit Plutos ist seine merkwürdige Atmosphäre. Obwohl sie nur rund ein Zehntausendstel so dicht ist wie die irdische Lufthülle, bietet sie uns einzigartige Einsichten in die Physik planetarer Atmosphären. Während die Luft der Erde nur ein einziges Gas – nämlich Wasserdampf – enthält, das regelmäßig Phasenübergänge vom gasförmigen zum festen Zustand durchläuft, sind es in Plutos Atmosphäre derer drei: Stickstoff, Kohlenmonoxid und Methan. Die gegenwärtige Temperatur auf Pluto schwankt von Region zu Region zwischen 40 und 60 Kelvin, also um bis zu fünfzig Prozent. Im Jahre 1989 stand Pluto auf seiner Umlaufbahn der Sonne am nächsten. Die Wissenschaftler erwarten, dass die Durchschnittstemperaturen fallen werden und dass ein Großteil der Atmosphäre kondensieren und als Schnee auf die Oberfläche rieseln wird, während der Planet sich nun langsam von der Sonne entfernt.

Außerdem verliert Pluto Gas an den Weltraum, und zwar mit einer Rate, wie sie sonst nur bei Kometen beobachtet wird. Die meisten Moleküle in der oberen Atmosphäre haben genug thermische Energie, um dem Schwerefeld des Planeten zu entkommen. Wir bezeichnen dieses extreme Abströmen als hydrodynamisches Entweichen. Pluto ist der einzige Planet im Sonnensystem, an dem wir diesen wichtigen Prozess direkt studieren können. In der Frühgeschichte der Erde könnte dieser Vorgang für den schnellen Verlust an Wasserstoff aus der ▶

irdischen Lufthülle verantwortlich gewesen sein. Das hydrodynamische Entweichen könnte also unsere Erde erst bewohnbar gemacht haben.

Es gibt eine weitere wichtige Verbindung zwischen Pluto und dem Leben auf der Erde: das wahrscheinliche Vorkommen von organischen Substanzen, zum Beispiel gefrorenem Methan auf Plutos Oberfläche, sowie von gefrorenem Wasser in seinem Inneren. Jüngste Beobachtungen von anderen Kuiper-Gürtel-Objekten zeigen, dass sie vermutlich ebenfalls große Mengen an Eis und organischen Stoffen beherbergen. Vor Milliarden von Jahren sind derartige Objekte regelmäßig in das innere Sonnensystem eingedrungen und haben so vielleicht die Erde mit dem Rohmaterial für die Entstehung des Lebens beliefert.

Eine wahrhaft große Reise

Betrachtet man all diese wissenschaftlichen Motive, dann ist es nicht schwer zu verstehen, warum die Planetenforscher unbedingt eine Raumsonde zu Pluto und in den Kuiper-Gürtel entsenden wollen. Und bedenkt man, wie abenteuerlich und zugleich romantisch die Erforschung neuer Welten ist, so überrascht auch die öffentliche Unterstützung für dieses Unternehmen nicht.

Die Ausschreibung der Nasa für eine Mission zum Pluto und zum Kuiper-Gürtel nannte drei Hauptaufgaben für die wissenschaftlichen Beobachtungen:

➤ Die Sonde muss die Oberfläche von Pluto und Charon mit einer mittleren Auflösung von einem Kilometer kartieren. Das Hubble-Weltraumteleskop hingegen erreicht für Pluto eine Auflösung von 500 Kilometern.

➤ Die Sonde muss die chemische Zusammensetzung der Oberfläche in den unterschiedlichen geologischen Regionen der beiden Himmelskörper messen.

➤ Die Sonde muss Zusammensetzung und Aufbau der Pluto-Atmosphäre bestimmen sowie die Rate, mit der Gas in den interplanetaren Raum entweicht.

Die Nasa benannte außerdem eine Reihe von Aufgaben geringerer Priorität, etwa die Messung der Oberflächentemperatur und die Suche nach weiteren Trabanten oder Ringen um Pluto. Ferner verlangte die Nasa, dass die Raumsonde alle genannten Aufgaben zumindest bei einem weiteren Kuiper-Gürtel-Objekt jenseits der Plutobahn erfüllt. Als die Nasa im vergangenen Jahr unseren Vorschlag auswählte, begründete sie dies damit, dass „New Horizons“ den größten wissenschaftlichen Nutzen bei zugleich geringstem Risiko von zeitlichen Verzögerungen und Kostenüberschreitungen biete. Das lag, zumindest zum Teil, an den robusten Eigenschaften der von uns entworfenen Sonde und an der Erfahrung der zu unserem Team gehörenden Institutionen, Raumsonden nach Plan und zu den veranschlagten – oder gar niedrigeren – Kosten zu liefern.

Die von uns entworfene „New Horizons“-Sonde ist relativ klein: Sie hat eine Masse von nur 416 Kilogramm. Das ist zwar schwerer als die ersten Pioneer-Sonden, aber leichter als die Voyager-Raumfahrzeuge. In dieser Masse ist bereits der Hydrazin-Treibstoff enthalten, der zur Steuerung der Sonde während des Fluges benötigt wird. Die meisten Komponenten des Raumfahrzeugs, wie etwa die Computer und das Antriebskontrollsystem, basieren auf Entwürfen für die Sonde Contour (eine Abkürzung von *Comet Nucleus Tour*), die im Juli 2002 starten und an mehreren Kometen vorbeifliegen soll. Diese Nutzung des Contour-Designs verringert sowohl die Kosten von „New Horizons“ als auch die technischen Risiken. Nahezu alle Untersysteme der Sonde sind zudem doppelt vorhanden, um die Zuverlässigkeit während des langen Fluges zu erhöhen.

Insgesamt vier Instrumenten-Pakete befinden sich an Bord von „New Horizons“:

➤ Persi dient der Kartierung und der Spektroskopie im sichtbaren, ultravioletten und infraroten Licht. Aus den Infrarot-Daten lassen sich Zusammensetzung, Temperatur und weitere Zustandsgrößen des Oberflächeneises auf Pluto und Charon ermitteln.

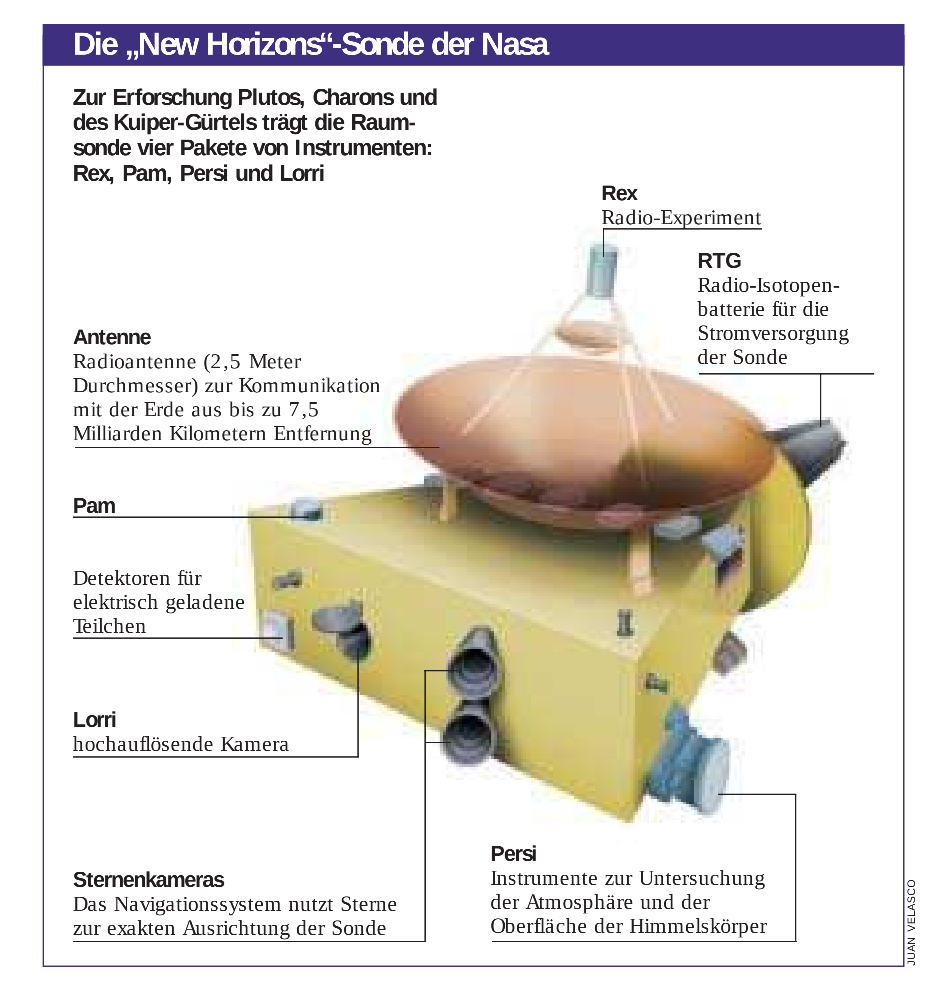
➤ Rex ist ein Radiowelleninstrument mit einer 2,5-Meter-Antenne, das den Aufbau der Pluto-Atmosphäre vermessen soll. Aus der Intensität der Mikrowellenstrahlung, welche die Himmelskörper abstrahlen, können die mittleren Temperaturen sowohl auf der Tag- als auch auf der Nachtseite der beiden Himmelskörper bestimmt werden.

➤ Pam enthält Detektoren für geladene Teilchen. Damit wollen wir Materie einfangen, die aus der Atmosphäre Plutos entweicht, und so die Entweichrate bestimmen.

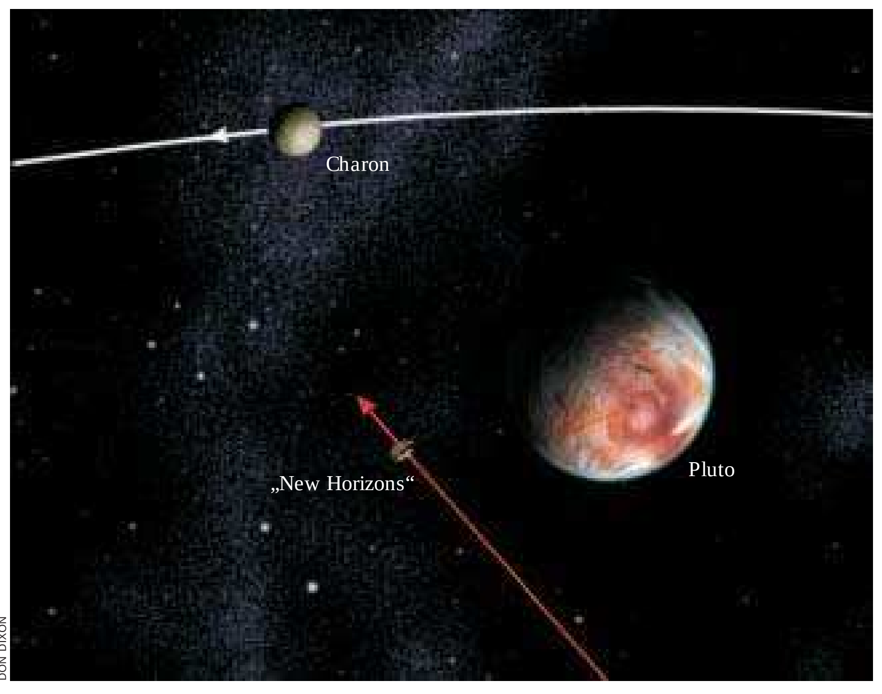
➤ Lorri ist eine Kamera mit hoher Auflösung, die Persi bei der Kartierung unterstützen soll. Während der größten Annäherung an das Ziel kann Persi Einzelheiten von einem Kilometer auflösen – Lorri hingegen kann noch fünfzig Meter große Strukturen erkennen.

Die „New Horizons“-Sonde der Nasa

Zur Erforschung Plutos, Charons und des Kuiper-Gürtels trägt die Raumsonde vier Pakete von Instrumenten: Rex, Pam, Persi und Lorri



JUAN VELASCO



Die Mission „New Horizons“ erreicht ihren Höhepunkt, wenn die Sonde in wenigen tausend Kilometern Entfernung an Pluto vorbeifliegt.

Wenn alles nach Plan verläuft, kann „New Horizons“ im Januar 2006 starten. Ihr erstes Ziel ist dann Jupiter. Während des Vorbeiflugs wird die Sonde vier Monate lang intensiv die über zwanzig Trabanten, die Polarlichter, die Atmosphäre und die Magnetosphäre Jupiters erforschen. Die Sonde nutzt Jupiters Schwerefeld, um für die weitere Reise zum Pluto Schwung zu holen (siehe Bild auf Seite 39). So kann „New Horizons“ bereits 2015 den Pluto erreichen. Die genaue Flugdauer hängt allerdings von der verwendeten Startrakete ab sowie vom exakten Starttermin.

Jetzt oder nie

Während der langen Reise von Jupiter zu Pluto werden sich die Bordinstrumente überwiegend in einer Art Tiefschlaf befinden. Die Abschaltung unbenutzter Systeme und die Beschränkung des Funkkontakts zur Erde auf ein Minimum verringern sowohl die Kosten als auch das Risiko von Geräteausfällen. Während des Tiefschlafs sendet die Sonde regelmäßig ein einfaches Zustandssignal zur Erde. Nur wenn ein unerwartetes Problem auftritt, müssen die Ingenieure auf der Erde darauf antworten. Einmal pro Jahr weckt die Bodenkontrolle die Sonde für fünfzig Tage, unterzieht sie einem gründlichen Test, kalibriert die wissenschaftlichen Instrumente und nimmt nötige Kurskorrekturen vor.

Im Gegensatz zu früheren Plänen für einen schnellen Vorbeiflug an Pluto und Charon beginnt „New Horizons“ bereits sechs Monate vor Erreichen des Ziels mit den Messungen. Wenn die Sonde noch 100 Millionen Kilometer von Pluto entfernt ist, was etwa 75 Tage vor der größten Annäherung der Fall sein wird, übertreffen die von ihr gelieferten Bilder jene des Hubble-Teleskops. In den folgenden Wochen können wir Pluto und Charon mit stetig steigender Auflösung kartieren und durch Vergleich der Bilder dynamische Phänomene wie das Wetter auf dem Planeten aufzeichnen. Und mit den hochauflösenden Bildern von Lorri können wir Pluto und Charon heranzoomen und so entscheiden, welche Oberflächenerscheinungen eine genauere Untersuchung wert sind. Am Tag der größten Annäherung, wenn „New Horizons“ wenige tausend Kilometer an Pluto vorbeizieht, wird Persi schließlich die besten Bilder der gesamten von der Sonne beleuchteten Hemisphären von Pluto und Charon liefern. Gleichzeitig wird Lorri Dutzende kleinerer Regionen dieser Himmelskörper mit hoher Auflösung fotografieren.

Unmittelbar nach dem Vorbeiflug wendet sich die Sonde und beginnt mit der Kartierung der dunklen Nachthälfte des Planeten, die schwach im reflektierten Licht Charons leuchtet. Außerdem soll die Antenne des Raumfahrzeugs dann ein starkes Signal von der Erde empfangen, das durch die Atmosphäre Plutos hindurchgeht. Die gemessene Refraktion des Radiosignals erlaubt es uns, Temperatur- und Dichteschichtung der Pluto-Atmosphäre zu ermitteln.

Nach dem Vorbeiflug am Pluto-Charon-System folgen innerhalb von fünf Jahren drei oder mehr Begegnungen mit Kuiper-Gürtel-Objekten. Die genaue Anzahl der angeflogenen Himmelskörper hängt davon ab, wie viel Treibstoff nach dem Besuch Plutos noch übrig ist.

Die Mission „New Horizons“ verspricht, unser Wissen über Pluto, Charon und den Kuiper-Gürtel zu revolutionieren. Doch das Potenzial für all die erhofften Entdeckungen geht verloren, wenn die Sonde nicht wie geplant 2006 startet. Auf Grund der sich verändernden Stellung der Planeten wäre die Sonde später nicht mehr in der Lage, ihre Reisegeschwindigkeit durch einen Vorbeiflug an Jupiter zu erhöhen. Wenn sie diese Gelegenheit verpasst, muss die Nasa bis 2018 warten – erst dann steht Jupiter erneut am richtigen Ort. Eine Begegnung mit Pluto wäre dann frühestens um 2025 möglich.

Bis dahin aber hat sich Pluto viele hundert Millionen Kilometer weiter von der Sonne entfernt und ist deshalb erheblich kälter als heute. Die extreme Neigung von Plutos Rotationsachse führt außerdem dazu, dass ein Großteil der südlichen Hemisphäre des Planeten im Schatten liegen und damit unbeobachtbar sein wird. Wahrscheinlich kondensiert bis dahin die gesamte Atmosphäre. Die nächste Gelegenheit, die Lufthülle Plutos zu analysieren, ergibt sich dann erst im 23. Jahrhundert, wenn der Planet sich erneut der Sonne nähert. ■

Literaturhinweise

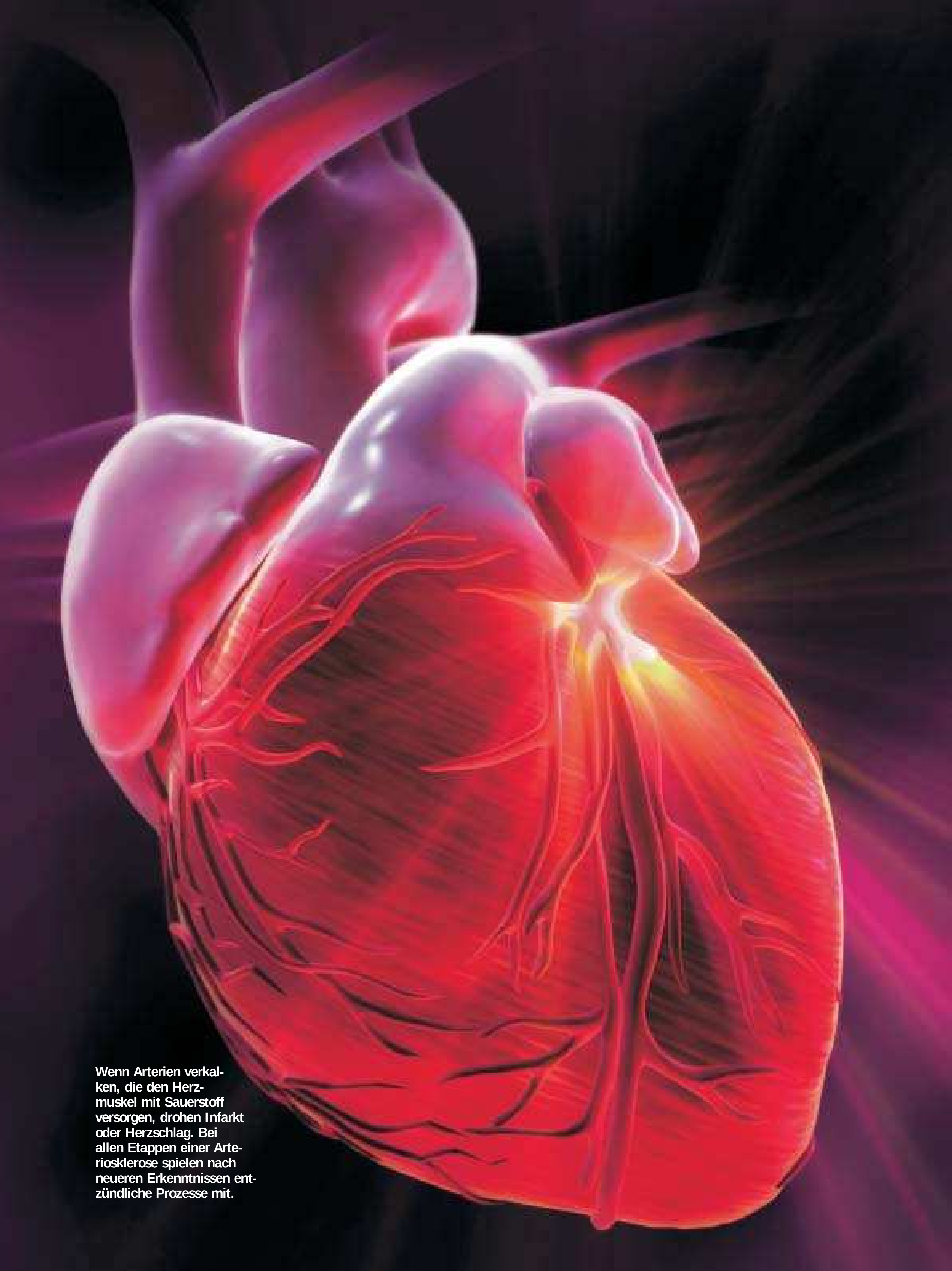
Beyond Pluto. Exploring the Outer Limits of the Solar System. Von John Davies. Cambridge University Press, 2001.

Pluto and Charon. Ice Worlds on the Ragged Edge of the Solar System. Von S. Alan Stern und Jacqueline Mitton. John Wiley & Sons, 1999.

Weblinks zum Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*



S. Alan Stern *ist Planetenwissenschaftler und wissenschaftlicher Leiter der „New Horizons“-Mission zum Pluto und zum Kuiper-Gürtel. Er hat 1989 an der Universität von Colorado promoviert und ist Direktor der Abteilung für Weltraumforschung des Southwest Research Institute in Boulder, Colorado.*



Wenn Arterien verkalken, die den Herzmuskel mit Sauerstoff versorgen, drohen Infarkt oder Herzschlag. Bei allen Etappen einer Arteriosklerose spielen nach neueren Erkenntnissen entzündliche Prozesse mit.

MEDIZIN

Arteriosklerose als Entzündung

In den westlichen Industrienationen fordert die Arterienverkalkung mehr Todesopfer als Krebs, vor allem als Urheber von Herzinfarkt und Schlaganfall. Das neue Entstehungsmodell der Arteriosklerose erklärt, warum auch viele scheinbar Gesunde plötzlich Infarkte erleiden.

Von Peter Libby

Noch vor fünf Jahren hätten die meisten Ärzte ihren Patienten Arteriosklerose beschrieben, als handele es sich um die Verkalkung einer Wasserleitung: Mit Fett beladenes Material baue sich nach und nach innen an der Arterienwand auf, verkalke und enge den Blutstrom allmählich ein. Schließlich gehe Gewebe zu Grunde, weil es von seiner Blutzufuhr abgeschnitten wird. Passiert das in Teilen des Herzmuskels oder des Gehirns, spreche man von einem Herzinfarkt beziehungsweise von einem Schlaganfall.

Inzwischen halten die meisten Forscher dieses simple Erklärungsmuster für überholt. Mehr als zwanzig Jahre Forschung haben gezeigt, dass Arterienwände nur wenig mit starren, passiven Röhren gemein haben. Sie enthalten schließlich lebende interaktive Zellen, die entscheidend beim Entstehen und Wachsen der arteriosklerotischen Ablagerungen mitwirken. Außerdem bilden sich die Ablagerungen, die Plaques, nicht auf, sondern in der Wandung. Nur relativ selten werden sie dabei so dick, dass allein ihre schiere Größe den Blutstrom auf ein Rinnsal schrumpfen lässt. Die meisten Herzattacken, ebenso viele Schlaganfälle, gehen vielmehr auf das Konto von weniger einengenden Plaques, die plötzlich aufplatzen und dadurch die Bildung eines Blutpfropfs auslösen. Erst dieser so genannte Thrombus verschließt innerhalb von Minuten die Ader.

Eine Schlüsselrolle spielen nach heutigem Kenntnisstand von Anfang an Entzündungsvorgänge. Solche Prozesse helfen normalerweise, eingedrungene Krankheitserreger oder Fremdkörper zu eliminieren. Hat sich beispielsweise ein Schnitt in den Finger entzündet, wird das Gewebe rot und heiß, schwillt an und schmerzt. Entzündliche Prozesse stecken hinter allen Phasen der Arteriosklerose, von der ersten Entstehung einer Plaque über ihr Wachstum bis hin zum Aufplatzen.

Aus dem gewandelten Konzept ergeben sich auch neue Ideen für eine Früherkennung und Therapie der Krankheit. Zugleich erklärt es einiges – vor allem, warum viele Herzattacken vom Infarkt bis zum plötzlichen Herztod scheinbar ohne Vorwarnung auftauchen und warum gewisse therapeutische Eingriffe, die Attacken verhindern sollen, letztlich oft versagen. Fortschritte in dieser Hinsicht sind bitter nötig. Herz-Kreislauf-Erkrankungen stehen in den westlichen Industrieländern vor Krebs auf Platz eins der Todesstatistik. In Deutschland stirbt fast jeder Zweite an einer Herz-Kreislauf-Erkrankung wie Herzinfarkt oder Schlaganfall. Mit zunehmendem Lebensstandard fordert diese Kategorie auch in Entwicklungsländern von Jahr zu Jahr mehr Tribut.

Was schon antike Ärzte als äußerlich sichtbare Anzeichen einer Entzündung beschrieben, spiegelt nur die Auswirkungen einer regelrechten Schlacht wider, die in einer mikroskopischen Kampfarena tobt. Ein realer Feind, aber auch ein vermeintlicher, lässt bestimmte Arten von weißen Blutkörperchen in dem bedrohten Gewebe zusammenströmen. Dort setzen sie ein ganzes Arsenal ▶

JEFF JOHNSON, HYBRID MEDICAL ANIMATION



an Stoffen frei, um die Infektion einzudämmen. Dazu zählen Oxidanzien, die Erreger direkt schädigen, sowie Signalmoleküle, die zahlreiche weitere Aktivitäten von Abwehrzellen koordinieren.

Welche Rolle spielen nun Entzündungsreaktionen beim Beginn einer Arteriosklerose? Den genauesten Einblick hat bislang die Untersuchung von „schlechtem“ Cholesterin verschafft. Das sind Partikel aus Lipoproteinen geringer Dichte, abgekürzt LDL, nach englisch *low density lipoprotein*. Wie ihr Name besagt, bestehen sie aus „fettigen“ Lipidmolekülen kombiniert mit wasserlöslichen Eiweißmolekülen (siehe Abbildung rechte Seite). Die Partikel transportieren Cholesterin vom Ort seiner Gewinnung in Leber und Darm zu anderen Organen und Geweben. Seit langem ist klar, dass zu große Mengen an prinzipiell lebenswichtigem LDL und Cholesterin einer Arteriosklerose Vorschub leisten. Eine Erklärung, wie dadurch die Bildung von Plaques gefördert wird, fehlte bis vor kurzem hingegen.

Untersuchungen an Zellkulturen sowie – meist genetisch veränderten – Tieren geben jedoch inzwischen zu erkennen, wie das Unheil seinen Lauf nimmt. Zunächst reichern sich LDL-Partikel in der innersten Schicht der Arterienwand an, die in intimem Kontakt mit dem Blutstrom steht. Diese Innenschicht oder Intima besteht hauptsächlich aus einer Tapete von Endothelzellen, die alle Adern innen auskleiden. Als Untertapete dient eine Matrix aus Bindegewebe, produziert von „glatten“ Muskelzellen (siehe Abbildung auf Seite 52/53). Bei normalen LDL-Konzentrationen im Blut wandern die Partikel frei in die Innenschicht ein und wieder heraus. Bei einem Überschuss bleiben sie allerdings dort leicht stecken. Gleichzeitig unterliegen ihre Lipid- und Eiweißkomponenten einem Oxidationsprozess – ähnlich wie er beim Ranzigwerden von Butter abläuft. Die Proteine bekommen obendrein Zuckergruppen angehängt. Diese Veränderungen werten Zellen in der Gefäßwand offenbar als Anzeichen drohender Gefahr, und sie rufen das Immunsystem auf den Plan.

Besonders aktive Alarmgeber sind dabei die Endothelzellen, die jetzt auf ihrer Blutseite Haftmoleküle ausfahren. Wie an Häkchen eines Klettverschlusses bleiben daran Monocyten locker haften. Das sind Vertreter der weißen Blutkörperchen, die auf dem Klettband abgebremst werden und nun darauf abrollen. Gleichzeitig senden Endothelzellen und glatte Muskelzellen chemische Hilferufe aus. Davon angelockt quetschen sich die Monocyten nun wie Spürhunde auf der Fährte zwischen den Endothelzellen hindurch in die Innenschicht.

Am Ende zum Platzen voll mit Fetttröpfchen

Hier sorgen diese und andere Substanzen dafür, dass sich die Einwanderer teilen und zu reifen Makrophagen – wörtlich: großen Fressern – weiterentwickeln. Voll ausgerüstet machen sich die Saubermänner sogleich an die Arbeit. Veranlasst durch Signalproteine der aktivierten Endothelzellen und glatten Muskelzellen in der Intima haben die Makrophagen molekulare Werkzeuge auf ihrer Oberfläche ausgebildet, mit denen sie Müll – darunter die stark veränderten LDL-Partikel – rasch ergreifen und aufnehmen können. Am Ende sind die großen Fresser bis zum Platzen voll mit Fetttröpfchen. Pathologen bezeichnen sie wegen ihres schaumigen Aussehens unter dem Mikroskop dann als Schaumzellen.

Weitere Vertreter der weißen Blutkörperchen, die T-Lymphocyten, folgen dem vermeintlichen Alarmruf in die Arterienwand. Dort geben sie immunregulatorische Stoffe ab, die eine Entzündungskaskade verstärken. Zusammen mit den Schaumzellen bilden diese spezialisierten Abwehrzellen Lipidstreifen in der Wandung (fachlich Lipidläsionen genannt). Schon in den Herzkranzgefäßen von Teenagern finden sich solche Veränderungen – Vorläufer der komplexer zusammengesetzten Plaques, die später Arterien entstellen werden.

Bei einer Schnittwunde etwa geben Makrophagen nach erfolgreicher Arbeit heilungsfördernde Substanzen ab. Solch ein Heilungsprozess begleitet auch die eher schleichende leichte Entzündung bei der Arteriosklerose. Anstatt allerdings den ursprünglichen Zustand wiederherzustellen, baut er jedoch die Aderwand völlig um. Das Ergebnis ist schließlich eine größere, komplexer gestaltete Plaque.

Alle Zellen in der entzündeten Innenschicht produzieren nämlich chemische Faktoren, die glatte Muskelzellen in der Mittelschicht, der Media, zu problematischem Tun verleiten: Sie unterwandern die Tapete, vermehren sich dort und produzieren Bausteine der Matrix, darunter das Faserprotein Kollagen. Auf dem Fettstreifen bildet sich so eine fibröse Deckschicht. Nach und nach kommt es darunter, innerhalb der Plaque, zu charakteristischen Veränderungen. Insbesondere geht ein Teil der Schaumzellen zu Grunde und setzt dabei seine Lipide frei. Die Region unter der Faserkappe heißt daher auch Lipidkern (siehe Abbildung Seite 53 links oben).

Trotz dieser Veränderungen strömt das Blut oft für Jahrzehnte relativ ungehindert daran vorbei. Denn überraschenderweise expandieren arteriosklerotische Plaques lange relativ wenig in das Gefäß hinein, weil es sich kompensatorisch erweitert. Tun sie es schließlich doch, kommt es zur Verengung des Blutkanals, fachsprachlich Stenose genannt. Erste Anzeichen spüren Betroffene meist bei körperlicher Anstrengung. Beim Sport oder auch bei Stress wird eine verengte Herzarterie sich unter Umständen nicht mehr genügend erweitern – wie sie es sonst täte, um das zu versorgende Gewebe besser zu durchbluten. Es kommt zur Brustenge (*Angina pectoris*) – meist erkennbar an einem Druck und Engegefühl hinter dem Brustbein, wobei der Schmerz oft weiter ausstrahlt. Stenosen in anderen Arterien können bei Anstrengung oder selbst beim einfachen Gehen beispielsweise schmerzhafte Krämpfe in den Waden auslösen.

Doch gehen nur etwa 15 Prozent aller Herzattacken auf das Konto einer

IN KÜRZE

➤ Nach neuer Erkenntnis stecken **Entzündungsprozesse als treibende Kraft hinter einer Arteriosklerose**: dem Anreichern fettbeladener Ablagerungen in den Arterienwänden. Die ältere Theorie, nach der sich diese Plaques auf einer lediglich passiven Wand ablagern, ist überholt.

➤ Entzündungsprozesse können auch dazu führen, dass eine Plaque plötzlich aufreißt. Dann ist die Gefahr besonders hoch, dass sich Blutgerinnsel bilden und die Arterien blockieren. Es kommt zu den gefürchteten Folgen einer Arteriosklerose wie **Herzinfarkt und Schlaganfall**.

➤ Ein Zuviel an schlechtem Cholesterin (LDL-Blutfetten) ist einer der Auslöser der Entzündungsreaktion in Arterien. **Lipidsenker** – seit längerem ein Eckpfeiler der Therapie – können anscheinend auch dieser Reaktion gegensteuern. Andere Möglichkeiten, in den entzündlichen Prozess einzugreifen, werden derzeit untersucht.

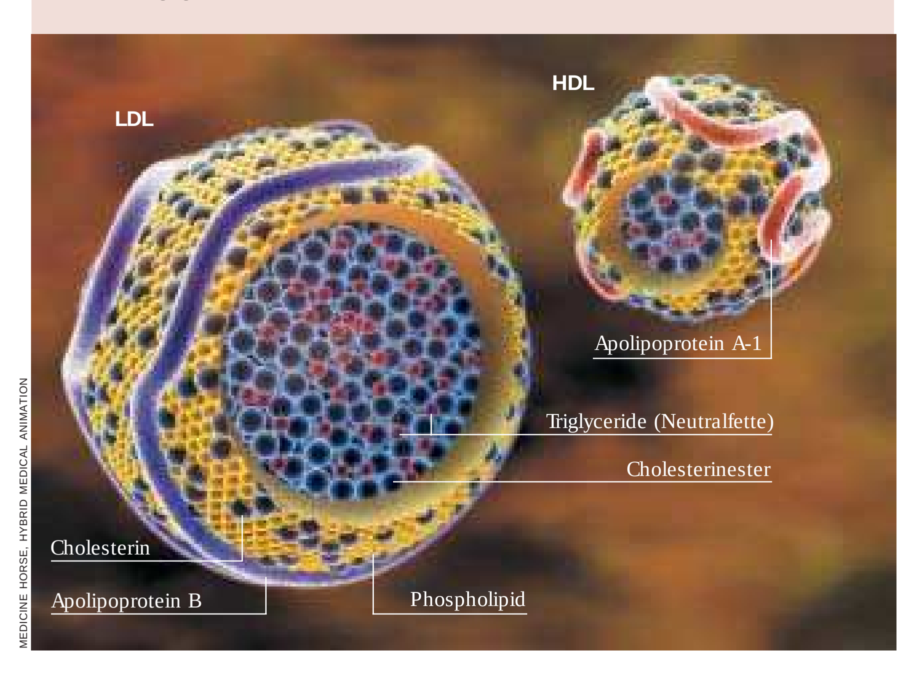
➤ Zusätzlich zum etablierten Bluttest auf Cholesterin könnte sich in naher Zukunft auch eine **Messung von Entzündungsmarkern** als hilfreich erweisen, um Risikopatienten zu identifizieren.

Neue Rollen für bekannte Akteure

Gesundheitsaufklärer sprechen zu Recht von bösem und gutem Cholesterin. Sie meinen damit Lipoproteine geringer Dichte (englisches Kürzel: LDL) beziehungsweise hoher Dichte (HDL). Die partikelförmigen Komplexe – hier angeschnitten dargestellt – agieren mehr als einst angenommen als die Schlechten und die Guten auf der Bühne der Arteriosklerose.

Lipoproteine dienen zum einen dem Transport von Cholesterin in der Blutbahn. LDL-Partikel befördern es vorrangig von der Leber in die Zielgewebe, die es etwa für die Reparatur von Zellmembranen oder die Produktion von Steroidhormonen benötigen. HDL-Partikel verfrachten hingegen Cholesterin in die Leber zurück, wo es recycelt oder abgebaut werden kann. Ursprünglich dachte man, ein Zuviel an LDL fördere eine Arteriosklerose, indem sich die Partikel auf der Gefäßwand ablagern. Diese Sicht ist überholt. LDL-Partikel reichern sich vielmehr in der Wandung an, wo einige ihrer Komponenten Oxidationsprozessen und weiteren chemischen Veränderungen unterliegen. Das macht sie entzündungsfördernd. Schritt für Schritt werden die Arterien an solchen Herden in gefährlicher Weise verändert.

Auch die Rolle der HDL-Partikel erscheint in neuem Licht. Ihr protektiver Effekt basiert nicht nur auf dem Abtransport von Cholesterin aus der Blutbahn – sie können offenbar auch gezielt der schädlichen Oxidation von LDL-Partikeln gegensteuern.



MEDICINE HORSE, HYBRID MEDICAL ANIMATION

Plaque, die tatsächlich so groß ist, dass sie allein schon die Blutzufuhr fast völlig abschneidet. (Ähnliches gilt für Schlaganfälle.) Inzwischen wissen wir: Ein Infarkt beispielsweise droht vor allem, wenn die faserige Kappe aufbricht; binnen kürzester Zeit entsteht über der Aufbruchstelle ein Blutgerinnsel. Die Gefahr solch einer Ruptur wächst, je dünner die Faserkappe einer Plaque ist und je mehr Lipidmasse und Makrophagen sich angesammelt haben. Zur Instabilität trägt wiederum eine Entzündungsreaktion bei.

Normalerweise sorgen Kollagenfasern, die von den glatten Muskelzellen hergestellt werden, für eine erhebliche Festigkeit der faserigen Deckschicht. Flackert aber in einer noch stabilen Plaque eine Entzündung auf, setzen beteiligte Stoffe der Kappe gleich doppelt zu. So wies meine Arbeitsgruppe nach, dass Entzündungsstoffe die Makrophagen zur Abgabe von Enzymen veranlassen können, die Kollagen abbauen. Fatalerweise vermögen sie gleichzeitig die glatten Muskelzellen daran zu hindern, neues frisches Kollagen abzugeben, wie es für die Reparatur der Fibrinkappe und den ständigen Nachschub erforderlich wäre.

Sickert aber erst einmal Blut durch feine Risse der Kappe in den Lipidkern, ist die Gerinnung programmiert. Blut enthält Vorstufen der Proteine für die so genannte Gerinnungskaskade, und in der Plaque verleiten T-Zellen die Schaumzellen dazu, reichlich Gewebsfaktor (englisch *tissue factor*, TF) zu bilden – einen sehr potenten Auslöser der Gerinnungskaskade. Zwar produziert der Körper auch Substanzen, die eine Gerinnung rechtzeitig stoppen oder einen Blutpfropf wieder auflösen können. Doch setzen entzündete Plaques gerade Stoffe frei, die diese Gegenmaßnahmen wieder unterlaufen.

Wird ein Gerinnsel trotzdem noch rechtzeitig natürlicherweise oder mit Hilfe von Medikamenten beseitigt, kann der Heilungsprozess wieder einsetzen. Der stellt zwar die Kappe wieder her, vergrößert dabei allerdings die Plaque durch die Bildung von Narbengewebe noch weiter. Einige Indizien sprechen dafür, dass Plaques in Schüben wachsen, bei denen jeweils Gerinnsel entstehen, sich wieder auflösen, dabei aber Narben zurücklassen.

Warum Herzinfarkte wie aus heiterem Himmel auftreten

Das neue wissenschaftliche Bild der Arteriosklerose, das sich aus all dem ergibt, erklärt auch, warum beispielsweise so viele Herzinfarkte wie aus heiterem Himmel auftreten: Denn die aufbrechenden Plaques sind nicht zwangsläufig jene, die weit in die Blutbahn ragen und bei bildgebenden Verfahren besonders gut in Erscheinung treten. Daraus wird auch klar, warum Verfahren von der Aufweitung verengter Arterien bis hin zum operativen Bypass zwar die Symptome einer *Angina pectoris* oft lindern, aber einen späteren Herzinfarkt trotzdem häufig nicht verhindern. Denn die eigentliche Gefahr steckt womöglich an ganz anderer Stelle – dort, wo eine Plaque den Innendurchmesser einer Arterie kaum einengt, dafür aber ein hohes Risiko hat, aufzureißen.

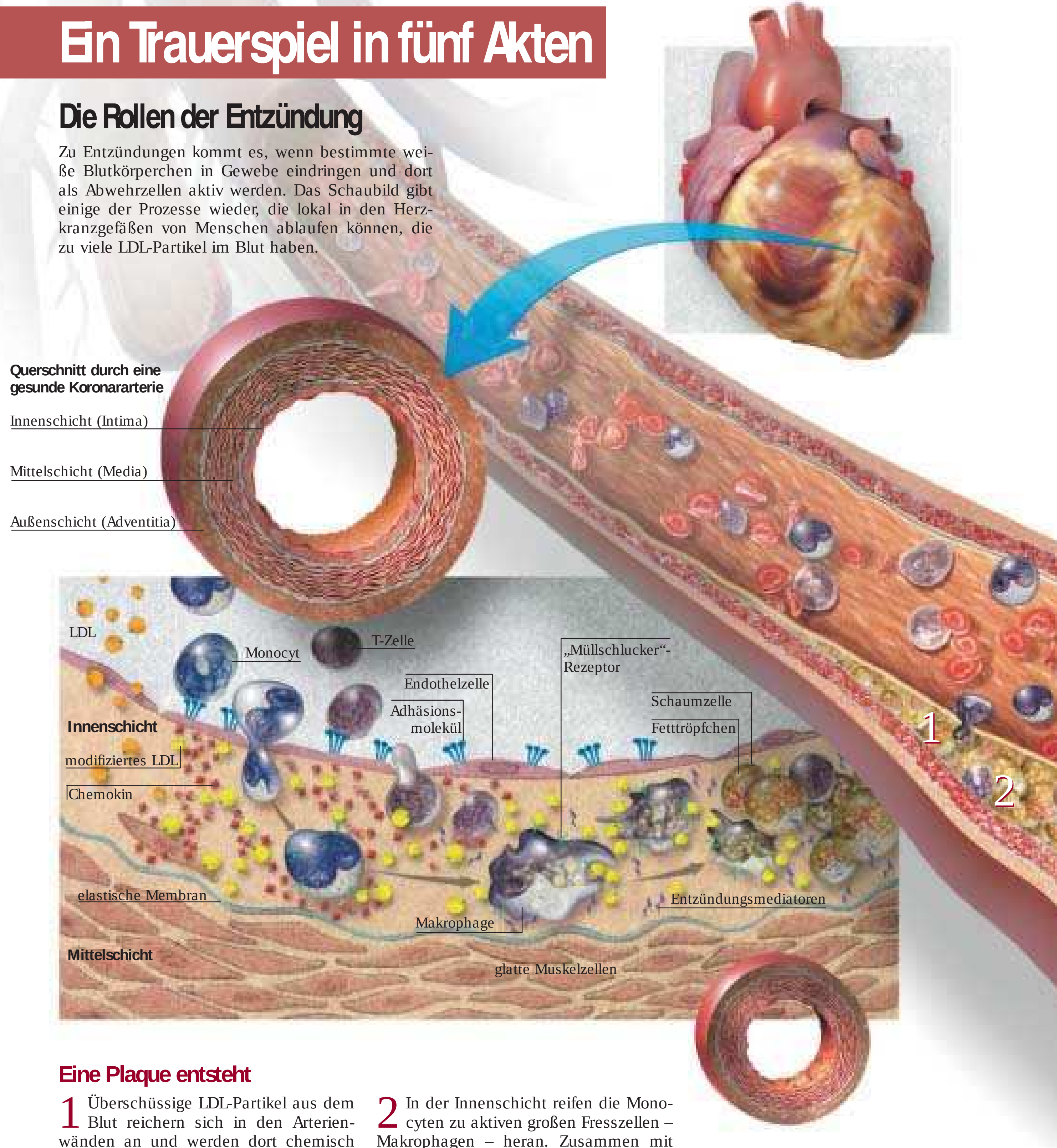
Selbst wenn die ursprüngliche Engstelle das eigentliche Problem war, ist die Aufweitung leider oft nur von kurzer Dauer – teilweise wohl, weil die Behandlung eine ausgeprägte Entzündungsreaktion auslösen kann.

Auch die Rolle der vergleichsweise intensiv untersuchten LDL-Partikel wurde bei der Arteriosklerose wahrscheinlich eher noch unterschätzt. Rund die Hälfte aller Patienten mit Herzattacken wie *Angina pectoris* oder Herzinfarkt weist keine überdurchschnittlichen LDL-Werte auf. Das heißt jedoch nicht, dass LDL hier nichts mit der Arteriosklerose zu tun hat, die diesen Erkrankungen zu Grunde liegt. Denn in den westlichen Industrieländern liegen die durchschnittlichen LDL-Werte weit über denen, die der Körper eigentlich benötigt, und zweifelsohne können auch diese Durch- ▶

Ein Trauerspiel in fünf Akten

Die Rollen der Entzündung

Zu Entzündungen kommt es, wenn bestimmte weiße Blutkörperchen in Gewebe eindringen und dort als Abwehrzellen aktiv werden. Das Schaubild gibt einige der Prozesse wieder, die lokal in den Herzkranzgefäßen von Menschen ablaufen können, die zu viele LDL-Partikel im Blut haben.



Eine Plaque entsteht

1 Überschüssige LDL-Partikel aus dem Blut reichern sich in den Arterienwänden an und werden dort chemisch verändert. Das veranlasst Endothelzellen, die Adern innen auskleiden, mit neuen Haftmolekülen nach Monocyten und T-Zellen im Blut zu fischen. Mit Lockstoffen – Chemokinen – sorgen sie dann dafür, dass diese beiden eingefangenen Arten von weißen Blutkörperchen in die Innenschicht einwandern.

2 In der Innenschicht reifen die Monocyten zu aktiven großen Fresszellen – Makrophagen – heran. Zusammen mit den T-Zellen beginnen sie mit der Produktion von Entzündungsmediatoren wie Immunbotenstoffen und Substanzen, die Zellteilungen fördern. Makrophagen bilden daraufhin auch molekulare Werkzeuge aus, mit denen sie die chemisch modifizierten LDL-Partikel aufnehmen können.

3 Die Makrophagen machen sich über LDL-Partikel her und füllen sich rasch mit fettigen Tröpfchen. Wegen ihres Aussehens werden sie jetzt Schaumzellen genannt. Zusammen mit T-Zellen bilden sie die so genannten Lipidstreifen – die früheste Form der arteriosklerotischen Plaque.

Die Plaque wächst …

4 Während die Plaque sich ausdehnt, bildet sich über ihrem Lipidkern eine faserige Kappe. Entzündungsmediatoren bringen nämlich glatte Muskelzellen der Mittelschicht dazu, bis unter die Endothelzellen zu wandern, sich dort zu vermehren und eine zähe, alles verklebende faserige Matrix zu synthetisieren. Die Kappe vergrößert zwar die Plaque noch mehr, grenzt das Innere aber gleichzeitig sicher gegen die Blutbahn ab.

wandernde glatte Muskelzelle
faserige Kappe
Lipidkern

… und reißt auf

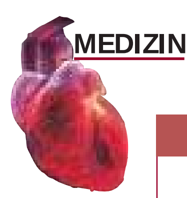
5 Entzündungsmediatoren aus den Schaumzellen können später die faserige Kappe gefährlich schwächen. Sie fördern letztlich den Abbau von Matrixmolekülen und behindern auch deren Nachschub aus glatten Muskelzellen. Neben abbauenden Enzymen stellen die Schaumzellen reichlich Gewebsfaktor her, einen potenten Auslöser der so genannten Gerinnungskaskade. Reißt eine vorgeschädigte Plaque auf, kommt die Gerinnungskaskade schlagartig in Gang. Wird das entstehende Gerinnsel zu groß, blockiert es den Blutstrom – es kommt zum Herzinfarkt. Teile des Herzmuskels sterben ab.

Blutpfropf
matrixabbauendes Enzym
Cytokine, die glatte Muskelzellen beeinträchtigen
Ruptur
Gewebsfaktor

rotes Blutkörperchen
weißes Blutkörperchen
3
Plaque
4
5
Blutpfropf

KEITH KASNOT

Blick in eine arteriosklerotisch geschädigte Arterie



INTERVIEW

„Ein enormes Marketingfeuer“

Gerd Assmann, Direktor des Instituts für Arterioskleroseforschung an der Universität Münster, ist Entwickler des Procam-Algorithmus – eines Verfahrens zur Berechnung des individuellen Herzinfarktrisikos. Der international renommierte Experte – Assmann ist unter anderem Chairman der Fachgesellschaft *International Task Force for Prevention of Coronary Heart Disease* – kritisiert überzogene Erwartungen an vermeintlich neue Risikoparameter.



Gerd Assmann

Spektrum der Wissenschaft: *Jeder Zehnte in Deutschland stirbt derzeit an Herzinfarkt. Fehlt den Ärzten das Instrumentarium, um das individuelle Infarktrisiko besser abschätzen und gezielter vorbeugen zu können?*

Dr. Gerd Assmann: Wir haben längst gute Instrumente zur Risikobestimmung. Gesamtcholesterin beziehungsweise so genanntes gutes und schlechtes Cholesterin sind dabei gerade mal zwei von etlichen Risikofaktoren, die große Fachgesellschaften heute bei der Bestimmung des Infarktrisikos zu Grunde legen. Zur Ermittlung der relevanten Daten haben wir beispielsweise 1979 die Procam-Studie gestartet. Mit fast 40 000 Teilnehmern ist sie weltweit die mit Abstand größte ihrer Art zur Bestimmung der Risikofaktoren für einen Herzinfarkt. Aus diesen umfangreichen Daten haben wir ein Berechnungsverfahren entwickelt, in das acht Faktoren eingehen.

Spektrum: *Welche sind das denn im Einzelnen?*

Assmann: Als Erstes das Alter, dann das schlechte Cholesterin, also das, was Ihr Arzt als LDL-Cholesterin bezeichnet. Gleich danach kommen Rauchen, zu wenig gutes Cholesterin, sprich HDL-Cholesterin, und zu hoher Blutdruck. Diabetes, bestimmte Neutralfette im Blut und eine familiäre Belastung sind weitere Risikofaktoren. Über diese acht Parameter kommen wir zu zuverlässigen therapeutischen Entscheidungen – zum Beispiel, wie viel schlechtes Cholesterin, also LDL, jemand maximal im Blut haben sollte.

Spektrum: *Ließe sich das Infarktrisiko durch einen Zusatztest genauer bestimmen? Schließlich kasteit sich nicht jeder gerne, besonders wenn er sich noch gesund fühlt.*

Assmann: Arteriosklerose ist eine chronische entzündliche Erkrankung der Gefäßwand, und daher wird von manchen Forschern die Bestimmung so genannter Entzündungsmarker propagiert. Tatsächlich finden sich bei allen Patienten mit Gefäßverkalkungen auch erhöhte Entzündungsmarker wie das C-reaktive Protein. Aber es ist nur einer von vielen, und bei – ansonsten gesunden – Arteriosklerosepatienten liegen seine Werte auch nur im oberen Teil des Normalbereichs. Somit ist der Test nicht spezifisch genug. Wenn wir in unser Berechnungsverfahren zusätzlich noch das C-reaktive Protein mit einbeziehen, sehen wir, dass dies aber auch wirklich gar nichts an der Effektivität der Risikovorhersage verbessert.



Elektronischer Testbogen: Bei *www.spektrum.de* unter „Aktuelles Heft“ finden Sie einen Link zum Procam-Verfahren, mit dem jeder sein individuelles Infarktrisiko ermitteln kann, sowie zu den Empfehlungen der *International Task Force for Prevention of Coronary Heart Disease.*

Spektrum: *Dennoch betonen einige Forscher, dass sich mit klassischen Risikofaktoren wie Cholesterinwerten nur etwa die Hälfte der tatsächlich Infarkt-Gefährdeten erkennen ließen.*

Assmann: Einen einzelnen Risikofaktor zu wählen ist ja auch unsinnig. Nehmen wir unser Rechenprogramm mit acht Faktoren und betrachten nur die Studienteilnehmer, die dann binnen zehn Jahren tatsächlich einen Herzinfarkt erlitten: 93 Prozent der Betroffenen fiel von Anfang an in eine der beiden obersten Risikogruppen. Ich sehe bei solchen Behauptungen eher ein gewisses Basisinteresse der diagnostischen Industrie am Werk, die naturgemäß gerne neue Parameter für neue Tests kreieren möchte.

Spektrum: *Wie weit fließt das aus der Procam-Studie ermittelte Verfahren heute schon in die Praxis ein?*

Assmann: Darauf stützen sich die Richtlinien der *Task Force for Prevention of Coronary Heart Disease*, immerhin einer großen internationalen Fachgesellschaft. Täglich schauen mittlerweile Tausende von Ärzten auf unsere Internetseite, wo jeder – auch der Laie – den danach erarbeiteten Testbogen kostenlos nutzen kann, wahlweise auf Deutsch oder auf Englisch. Wir können allerdings nicht unbedingt davon ausgehen, dass eine Formel, die in einer großen Studie hier zu Lande entwickelt wurde, auch auf Mittelmeerländer oder gar andere Kontinente eins zu eins übertragbar ist. Sie müssen daher solche Algorithmen je nach Bevölkerung mög-

lichst justieren. Wo es aber bislang keine spezifischeren Daten gibt, nutzt man in Europa unsere Procam-Daten – in den USA aber einen Algorithmus aus den Daten der Framingham-Studie, die älter ist.

Spektrum: *Seit 2001 gibt es nun auch in den USA neue Richtlinien zu den Maximalwerten für LDL-Cholesterin in verschiedenen Risikogruppen. Weichen sie von den hiesigen ab?*

Assmann: Die US-Richtlinien haben sich im Wesentlichen an unsere Empfehlungen angelehnt. Was die Zielwerte für LDL-Cholesterin angeht – zum Beispiel maximal 100 bei Risikopatienten –, sind die beiden Empfehlungen weitgehend deckungsgleich.

Spektrum: *Trotzdem geistern immer wieder neue verwirrende Meldungen zur Cholesterinsenkung durch die Medien. Etwa die, dass Menschen selbst dann von den als Cholesterinsenkern bekannten Statinen profitieren, wenn ihr Blut keine zu hohen LDL-Werte aufweist.*

Assmann: Es gibt zwar Spekulationen, dass Statine auch direkt entzündungshemmend wirken und deshalb selbst bei niedrigen Cholesterinspiegeln noch einer Arteriosklerose vorbeugen könnten. Doch haben wir bislang keine wissenschaftlich klare Auskunft darüber, ob letztlich die niedrigen Cholesterinwerte ausschlaggebend sind oder entzündungshemmende Effekte eine wesentliche zusätzliche Rolle spielen. Nicht zu unterschätzen ist auch: Der Weltmarkt für Statine lag im vorigen Jahr bei etwa 15 Milliarden US-Dollar. Den teilen sich einige wenige Firmen. Sie können sich vorstellen, dass hier ein enormes Marketingfeuer entfacht wird, sodass selbst Experten gelegentlich verwirrt sind.

Spektrum: *Was ist mit den Nebenwirkungen? Man denke an Lipobay.*

Assmann: Statine haben prinzipiell ein sehr gutes Nutzen-Risiko-Verhältnis. Aber eines sei jedem ans Herz gelegt: Die Masse aller Infarkte hat mit Übergewicht, Insulinresistenz, Zigarettenrauchen, Bluthochdruck zu tun. Fettstoffwechselstörungen sind besonders häufig bei Diabetikern. Diese Probleme aber lassen sich oft bereits durch eine gesündere Lebensführung verbessern.

Das Interview führte ***Dr. Bernhard Epping****. Er arbeitet als freier Journalist mit Schwerpunkt Biologie und Medizin in Tübingen.*

schnittswerte bereits eine Arteriosklerose fördern. Auf Grund neuer Daten zum Zusammenhang zwischen Herzgesundheit und Lipoprotein-Spiegel haben Experten die Definition gesunder LDL-Werte nochmals enger gefasst. So hat ein Expertenkomitee in Kooperation mit den US-amerikanischen Nationalen Gesundheitsinstituten in Bethesda (Maryland) erst im vergangenen Jahr neue Richtlinien dazu aufgelegt (Kasten Seite 56).

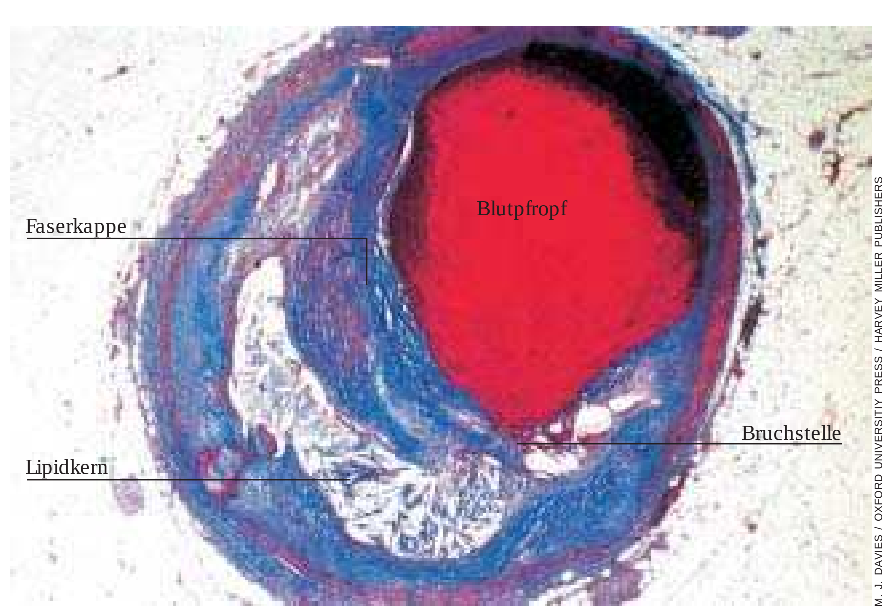
Die Rolle anderer Risikofaktoren bei den Entzündungsreaktionen harrt derzeit noch einer ähnlich intensiven Erforschung wie beim LDL. Allerdings gibt es bereits viel sagende Hinweise. Diabetes erhöht die Menge an Traubenzucker im Blut, was wiederum die „Verzuckerung" von Proteinen und damit die entzündlichen Eigenschaften von LDL in die Höhe treiben kann. Übergewicht steigert generell das Risiko für Diabetes. Rauchen fördert die Bildung reaktionsstarker Oxidanzien und dürfte dadurch die Oxidation von LDL-Bestandteilen fördern. Bluthochdruck hat wohl keinen unmittelbaren Einfluss auf Entzündungsprozesse. Doch scheint das Hormon Angiotensin II, das für viele Fälle von Bluthochdruck mitverantwortlich ist, parallel auch Entzündungsprozesse zu fördern.

Hingegen scheint gutes Cholesterin einen generell positiven Einfluss auszuüben. Dabei handelt es sich um Lipoproteine hoher Dichte (HDL, nach englisch *high density lipoprotein*). Sinkt ihre Konzentration, wächst das Risiko für einen Herzinfarkt. Ein Teil der positiven Wirkungen von HDL mag auf einen entzündungshemmenden Effekt zurückgehen. Neben Cholesterin transportieren diese Partikel nämlich auch Enzyme, die oxidierte Lipide abbauen. Für eine individuelle Risikoabschätzung bestimmen Ärzte deshalb neben LDL auch HDL beziehungsweise damit zusammenhängende Kenngrößen.

Entzündungsprozesse im Körper dienen normalerweise der Bekämpfung von Infektionserregern. Es war daher nur logisch, auch danach zu fahnden, ob womöglich irgendwelche Infektionen zur Entzündung der Arterien beitragen. Neuere Arbeiten deuten aber darauf hin, dass sich eine Arteriosklerose ganz ohne Infektion entwickeln kann. Dennoch gibt es Indizien, dass manche Mikroorganismen wie das Herpesvirus oder das Bakterium *Chlamydia pneumoniae* (ein häufiger Erreger von Atemwegsinfekten) eine Arteriosklerose gelegentlich induzieren oder verschlimmern könnten. Das Bakterium kommt in etlichen arteriosklerotischen Plaques vor, und seine Bestandteile können Makrophagen, Endothel- und glatte Muskelzellen zu Entzündungsreaktionen veranlassen.

Das Echo von Scharmützeln

Denkbar ist auch eine gewisse Fernwirkung – ich nenne es einen Echoeffekt. Signalstoffe, die der Körper bei der lokalen Bekämpfung von Infektionserregern einsetzt, könnten in die Blutbahn entkommen. Theoretisch könnten diese so genannten Entzündungsmediatoren auch weiße Blutkörperchen in arteriosklerotischen Plaques stimulieren und so deren ▶



Ein Blutpfropf (rot) hat sich auf einer aufgeplatzten arteriosklerotischen Plaque gebildet, hier in einer vergrößerten, quer geschnittenen Herzkranzarterie. Manche Thromben lösen sich noch rechtzeitig wieder auf, bevor es zum Infarkt kommt. Der Riss vernarbt dann, vergrößert aber auf diese Weise die Plaque.



Wachsen oder Aufbrechen fördern. Diese Hypothese ist Grundlage für mehrere laufende klinische Studien, bei denen Risikopatienten vorübergehend vorsorglich Antibiotika erhalten. In einer vor kurzem abgeschlossenen Studie vermochte diese Maßnahme jedoch neuerlichen Herzattacken nicht vorzubeugen.

Wenn Entzündungsprozesse bei der Arteriosklerose so bedeutsam sind, dann müssten entzündungshemmende Medikamente den Verlauf der Erkrankung vermutlich bremsen. Einige Wirkstoffe – darunter die von Aspirin bekannte Acetylsalicylsäure – werden bereits eingesetzt oder getestet. Die Substanz gehört in die Gruppe der nicht-steroidalen Entzündungshemmer, die noch andere bekannte schmerzlindernde Verbindungen wie Ibuprofen und Naproxen umfasst. (Ein steroidaler Entzündungshemmer wäre beispielsweise Cortison.) Die Stoffe blockieren die Synthese bestimmter Entzündungsmediatoren – darunter die der Prostaglandine, die Schmerzen und Fieber verursachen.

Es gibt überzeugende Daten dafür, dass Acetylsalicylsäure vor Herzinfarkten sowie manche Patienten auch gegen Mini-Schlaganfälle, vorübergehende Durchblutungsstörungen im Gehirn, schützen kann. Allerdings sprechen die geringen Dosierungen, die dabei zum Einsatz kommen, eher dafür, dass der Schutz auf den gerinnungshemmenden und nicht auf den anti-entzündlichen Eigenschaften des Mittels beruht.

Für andere derartige Entzündungshemmer bei Arteriosklerose liegen bislang nur wenige klinische Daten vor. So genannte Superaspirine – selektive Inhibitoren des Enzyms, das die Synthese von Prostaglandin katalysiert – dürften nach ersten Hinweisen bei einigen Patienten die Bildung von Gerinnseln womöglich sogar fördern. Für Cortison und ähnliche Steroide ist bislang kein Nutzen belegt, was das Auftreten arteriosklerotischer Komplikationen anbelangt. Für eine langfristige Anwendung dürften ihre schädlichen Nebenwirkungen wohl auch zu hoch sein.

Sollten sich entzündungshemmende Medikamente als wirksam erweisen, müssten die Patienten sie vermutlich lebenslang einnehmen – eine beunruhigende Vorstellung. Denn ein permanenter Eingriff in das Entzündungsgeschehen im Körper hätte wahrscheinlich einen zu hohen Preis: ein erhöhtes Infektionsrisiko. Ich setze deshalb erst einmal auf eine naheliegendere Strategie: Wir müssen uns darauf konzentrieren, die Faktoren an der Wurzel der arteriellen Entzündungsreaktion auszuschalten.

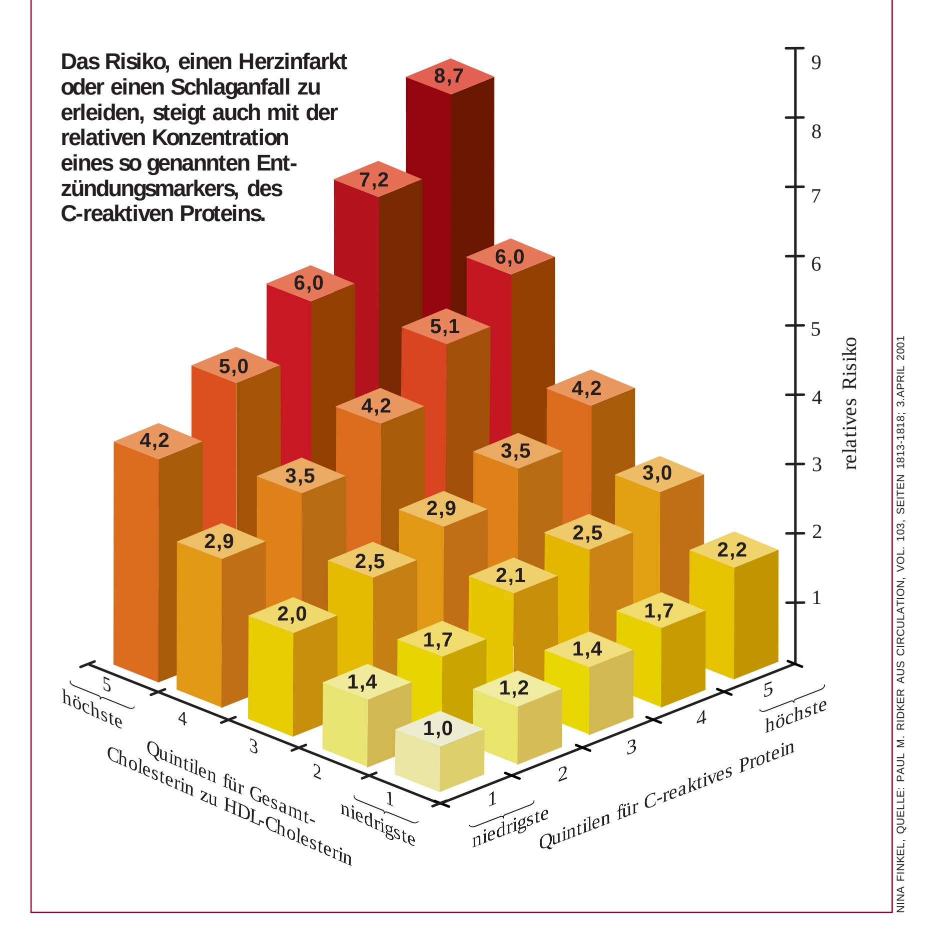
Risikobestimmung

Ein aufschlussreicher Test

Wem droht ein Herzinfarkt oder Schlaganfall, und wer braucht eine vorbeugende Behandlung? Bislang orientieren sich Ärzte gewöhnlich stark am Blutspiegel von Cholesterin, genauer: der verschiedenen Cholesterin transportierenden Lipoproteine. Allerdings wird damit ein erheblicher Teil der Gefährdeten nicht erkannt. Ein Teil der Lücke ließe sich womöglich durch einen weiteren, aber unabhängigen Messwert schließen: der Blutspiegel eines Entzündungsmarkers – des C-reaktiven Proteins (CRP). So hat Paul M. Ridker vom Brigham and Women's Hospital in Boston vor kurzem gezeigt, dass die Bestimmung von CRP plus dem Cholesterin-Verhältnis eine bessere Risikoabschätzung erlaubt als von Cholesterin allein (Grafik unten).

Ridker sortierte die Werte für Cholesterin und CRP einer erwachsenen „Normalbevölkerung" in jeweils fünf separate Gruppen (Quintilen). Dann ermittelte er das jeweilige relative Risiko für unterschiedliche Kombinationen. Das Risiko der Gruppe, deren Werte für Cholesterin und CRP beide in der niedrigsten Quintile liegen, setzte er auf „eins" (vorderste Ecke der Grafik). Anschließend berechnete er die Zunahme des Risikos, wenn sich die Werte eines oder beider Parameter verändern.

Ergebnis: Hohe Werte für CRP bedeuten ein deutlich höheres Risiko für eine Herzattacke oder einen Schlaganfall – selbst dann, wenn die Cholesterinwerte eher beruhigend erscheinen. So sind Menschen mit durchschnittlichem Cholesterin-Verhältnis (dritte Quintile), aber den höchsten Werten für CRP, gleich stark gefährdet wie Personen mit den höchsten Werten für Cholesterin und gleichzeitig den niedrigsten Werten für C-reaktives Protein. Mit Abstand am riskantesten sind Höchstwerte für beide Parameter. Eine größere Studie müsste aber erst noch belegen, dass Patienten von einer vorbeugenden Behandlung wirklich profitieren, die sich an den kombinierten Werten orientiert.



Das Risiko, einen Herzinfarkt oder einen Schlaganfall zu erleiden, steigt auch mit der relativen Konzentration eines so genannten Entzündungsmarkers, des C-reaktiven Proteins.

NINA FINKEL, QUELLE: PAUL M. RIDKER AUS CIRCULATION, VOL. 103, SEITEN 1813-1818; 3.APRIL 2001

Neue Grenzwerte für schlechtes Cholesterin

Als optimal gelten jetzt in den USA Werte von unter 100 Milligramm je Deziliter Blutserum (mg/dl) für schlechtes Cholesterin. Fachleute sprechen von Lipoproteinen geringer Dichte, nach dem englischen Begriff abgekürzt LDL. Die Schwelle, ab der für manche Personen mit mehreren Risikofaktoren die medikamentöse Therapie beginnen sollte, liegt nach den neuen US-Empfehlungen bei 130 und nicht mehr bei 160 mg/dl.

Erwachsenen mit einem relativ geringen Risiko für eine koronare Herzkrankheit wird – wie vorher schon – ab Werten von mehr als 160 zunächst einmal eine Änderung ihres Lebensstils empfohlen. Dazu zählen etwa eine gesündere Ernährung und mehr körperliche Bewegung. Erst ab 190 mg/dl ist auch hier eine medikamentöse Therapie zu erwägen. Diese neuen Empfehlungen decken sich im Wesentlichen mit den Richtlinien einer internationalen Fachgesellschaft.

Einige probate Mittel sind zum Glück bereits verfügbar: Eine gesunde Ernährung, regelmäßige körperliche Bewegung und gegebenenfalls eine Gewichtsreduktion können das Risiko für Herzattacken senken und gleichzeitig Alters-Diabetes vorbeugen oder mindern. Außerdem haben seit 1994 mehrere sorgfältige klinische Studien zweifelsfrei belegt, dass Statine – heute breit verordnete Medikamente zur Lipidsenkung – die Wahrscheinlichkeit arteriosklerotischer Komplikationen reduzieren und damit offenbar das Leben vieler Menschen verlängern können. Und das tun sie quer durch alle untersuchten Gruppen von Patienten mit breit gestreuten, unterschiedlichen Risikowerten. Der Wirkstoff Cerivastatin, bekannt unter dem Handelsnamen Lipobay, wurde letztes Jahr vom Markt genommen, weil er in Kombination mit einem weiteren Cholesterinsenker häufiger als andere Statine zu problematischen Nebenwirkungen führte.

Anti-oxidative Vitamine enttäuschten

Verengungen in den Arterien werden von diesen Arzneistoffen anscheinend nur geringfügig reduziert. Stattdessen deuten Untersuchungen an Zellen, Tieren und Menschen darauf hin, dass die Senkung der Lipidwerte – erwartungsgemäß – gleichzeitig helfen dürfte, Entzündungen einzudämmen, welche den Abbau und das Aufplatzen von Plaques fördern. Obendrein scheinen die Mittel noch auf anderem Wege eine anti-entzündliche Wirkung zu entfalten – zumindest in Zellkulturen und im Tierexperiment: Statine sorgen nicht nur für einen beschleunigten Abbau von LDL, sondern begrenzen auch die Verfügbarkeit anderer Stoffe, die Zellen für Entzündungsmediatoren ansprechbar machen.

Noch im Experimentierstadium befinden sich Wirkstoffe, die andere Risikofaktoren für Herzinfarkt und Schlaganfall anvisieren. Gedacht ist an Substanzen, die den HDL-Spiegel – das gute Cholesterin – erhöhen oder die Wirkung des blutdrucksteigernden Hormons Angiotensin II verringern. Auch sie wirken dann womöglich entzündungshemmend. Die Einnahme anti-oxidativer Vitamine erwies sich hingegen als enttäuschend.

Für die Zukunft benötigen Ärzte darüber hinaus auch bessere Methoden, um eine gefährliche Arteriosklerose selbst in der großen Gruppe von Menschen ausfindig zu machen, deren Lipidwerte zu gut sind, als dass sie eine Behandlung rechtfertigen würden. Hier mag unter Umständen eine Kombinationsmessung von Lipidwerten plus dem Wert des so genannten C-reaktiven Proteins hilfreich sein. Darauf deuten neuere Befunde hin.

Taucht dieses Eiweißmolekül im Blut auf, ist das ein Anzeichen dafür, dass irgendwo im Körper ein Entzündungsprozess abläuft. Stark erhöhte Werte zeigen gleichzeitig ein erhöhtes Risiko für Herzinfarkt oder Schlaganfall an – und zwar auch dann, wenn die LDL-Werte noch keine Behandlung rechtfertigen (siehe Kasten auf der linken Seite). Zumindest in einer Studie sank die Rate der Herzattacken, wenn Personen mit unterdurchschnittlichen LDL-Werten, aber hohen Werten für das C-reaktive Protein Statine erhielten. Das Ergebnis muss allerdings erst in einer wesentlich größeren Studie bestätigt werden, bevor Ärzte entsprechende Patienten auf fundierter Basis damit behandeln können. Was einige Mediziner in den USA jedoch nicht daran hindert, schon heute diagnostische Tests auf C-reaktives Protein in ihrer Praxis einzusetzen (siehe dazu das Interview auf Seite 54).

In wem tickt unerkannt die Zeitbombe?

Gefragt sind zudem schonende Methoden, mit denen sich speziell bruchempfindliche Plaques aufspüren lassen. Sie könnten jene Menschen herauspicken helfen, die keine ausgeprägten Risikofaktoren aufweisen, in denen aber dennoch die Zeitbombe tickt. Die Ideen hierzu reichen von der Messung erhöhter Temperaturen in entzündeten, arteriosklerotischen Blutgefäßen bis zu abgewandelten bildgebenden Verfahren auf der Basis der Magnetresonanz-Tomografie oder der Computertomografie. Unterdessen fahnden Genetiker nach Genvarianten, die ihre Träger anfällig für chronische Entzündungen, Arteriosklerose und damit auch deren Folgen machen.

Die meiste Zeit in der Geschichte der Menschheit hat die Fähigkeit unseres Körpers, mittels Entzündungsreaktionen Infektionen abzuwehren, eindeutig einige Nachteile dieser Schutzmaßnahme aufgewogen. Heute, wo wir länger leben, uns weniger bewegen, zu viel essen und oft auch noch rauchen, leiden viele von uns an den Schattenseiten dieser Reaktion. Je mehr wir jetzt von den dabei ablaufenden Vorgängen verstehen, desto eher können wir auch neue Therapien gegen Arteriosklerose entwickeln – eine Krankheit, deren Bedrohung weltweit wächst, die viele Menschen mit Invalidität schlägt und viel zu viele vorzeitig das Leben kostet. ■



Peter Libby, heute Chef der Abteilung Kardiovaskuläre Medizin am Brigham and Women's Hospital in Boston, promovierte an der Universität von Kalifornien in San Diego in Medizin. Er ist Mallinckrodt Professor of Medicine an der Harvard-Universität und Mitherausgeber eines Klassikers unter den kardiologischen Lehrbüchern. Für ihn ist eine gesunde Lebensführung der Eckpfeiler zur Vorbeugung vor Herz-Kreislauf-Erkrankungen.

Literaturhinweise

Inflammation and Atherosclerosis. Von Peter Libby, Paul M. Ridker und Attilio Maseri in: Circulation, Bd.105, No. 9, S.1135; 5. März 2002.

Current Concepts of the Pathogenesis of the Acute Coronary Syndrome. Von Peter Libby in: Circulation, Bd. 104, No. 3, S. 365; 17. Juli 2001.

Sonderdrucke zum Thema Herz-Kreislauf-Krankheiten bietet gegen Gebühr (jeweils 1,53 Euro in Briefmarken) die Deutsche Herzstiftung, Vogtstraße 50, 60322 Frankfurt. Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei **www.spektrum.de** *unter „Aktuelles Heft".*



Apokalypse im Erdmittelalter: Der Aufprall eines riesigen Asteroiden – hier der Krater in künstlerischer Übertreibung – beendete die Ära der Dinosaurier.

KAMIL VOJNAR

Tödliche Treffer in Serie

Eine kosmische Bombe hat höchstwahrscheinlich vor 65 Millionen Jahren die Dinosaurier ausgelöscht. Auch andere, frühere Massensterben dürften auf das Konto verheerender Einschläge kilometergroßer Meteoriten gehen.

Von Luann Becker

Kaum jemand ist sich dessen bewusst – aber unser Planet steht unter einem ständigen Beschuss aus dem Kosmos. In unserer galaktischen Nachbarschaft wimmelt es von Kometen, Asteroiden und anderen Überbleibseln aus der Frühzeit des Sonnensystems. Der größte Teil dieses Weltraumschutts besteht aus interplanetarem Staub; doch unter den kosmischen Projektilen, die in der Vergangenheit auf den Globus geprasselt sind, gab es auch einige gewaltige Brocken mit Durchmessern von fünf oder mehr Kilometern.

Anhand der Zahl der Mondkrater konnten Astronomen abschätzen, dass während der letzten 600 Millionen Jahre etwa sechzig solcher großkalibrigen Geschosse die Erde getroffen haben müssen. Selbst die kleinsten unter ihnen sollten eine fast hundert Kilometer breite Narbe hinterlassen und beim Aufprall eine kinetische Energie freigesetzt haben, die der Detonation von zehn Teratonnen Trinitrotoluol (TNT) entspricht; eine ähnlich unvorstellbare Sprengkraft hätten knapp eine Milliarde Hiroshima- oder eine Million Wasserstoffbomben.

Derart verheerende Einschläge haben die Bedingungen für das irdische Leben binnen kürzester Frist dramatisch verändert. Tatsächlich zeigt die fossile Überlieferung während der letzten 600 Millionen Jahre fünf große biologische Krisen, bei denen jeweils mehr als die Hälfte aller vorhandenen Arten zu Grunde ging. Nach über einem Jahrzehnt heftiger Kontroversen gilt inzwischen als gesichert, dass ein Asteroideneinschlag eine dieser Katastrophen verursachte: das Aussterben der Dinosaurier vor 65 Millionen Jahren. Dagegen gab es bei den anderen Massenextinktionen bis vor kurzem keine klaren Belege dafür, dass sie mit dem Aufprall eines kosmischen Objekts zusammenhängen.

In den letzten zwei Jahren ist es Wissenschaftlern jedoch gelungen, Orte und Zeitpunkte großer Einschläge genauer einzugrenzen. Insbesondere entdeckten sie in gewissen geologischen Schichten neue chemische Indikatoren (Tracer) für Asteroideneinschläge – so in Gesteinen vom Ende der Epoche des Perms vor 250 Millionen Jahren. Damals gingen bei einer der schlimmsten bekannten Massenextinktionen, dem so genannten Großen Sterben, neunzig Prozent der Lebewesen in den Weltmeeren zu Grunde.

Woran erkennt man den Einschlag einer steinernen Bombe aus dem All? Die besten direkten Hinweise sind Krater und durch den Aufprall zertrümmerte oder komprimierte Gesteine. In der Tat finden sich derlei Zeugnisse vereinzelt in erdgeschichtlichen Perioden, in denen eine Massenextinktion stattgefunden hat. Allerdings sind sie oft unter dicken Se-dimentschichten verborgen oder durch Erosion unkenntlich gemacht.

Inzwischen wurden weitere direkte wie indirekte Spuren identifiziert, welche die größten Einschläge in der Abfolge der Gesteinsformationen hinterlassen haben. Zu den direkten Zeugnissen gehören winzige mineralische Kristalle, die beim Aufprall zersplittert oder sogar geschmolzen sind. Wichtige Anhaltspunkte liefern auch Konzentrationen chemischer Elemente, von denen man weiß, dass sie im All häufig, auf der Erde aber nur selten vorkommen. Einen ausgesprochen exotischen neuen Tracer fanden meine Kollegen und ich in diversen Sedimenten und Kratern, die vermutlich von einem Asteroiden herrühren: Fullerene, also kugelförmige Kohlenstoffmoleküle, in denen Edelgase extraterrestrischen Ursprungs eingeschlossen waren. ▶

Die indirekten Spuren stammen meist aus dem biologischen Bereich – etwa ein schnelles Absterben der Vegetation oder ein abrupter Produktivitätsabfall der Meeresorganismen. Beides trat, wie Paläontologen festgestellt haben, zeitgleich mit mindestens drei der fünf großen Massenextinktionen auf. Derart schwere plötzliche Störungen des Ökosystems der Erde sind ungewöhnlich, und für manche Wissenschaftler kommt als Ursache nur ein Asteroideneinschlag in Frage.

Saurier-Killer

Den ersten Hinweis darauf, dass ein großes Artensterben auf ein Geschoss aus dem All zurückgehen könnte, lieferte eine extrem hohe Konzentration an Iridium in einer dünnen Gesteinsschicht. Dieses Edelmetall findet sich in Gesteinen an der Erdoberfläche nur in äußerst geringer Konzentration, während es in Meteoriten häufig ist. 1980 entdeckte ein Forscherteam von der Universität von Kalifornien in Berkeley unter Führung des Physik-Nobelpreisträgers Luis Alvarez und seines Sohnes, des Geologen Walter Alvarez, das seltene Element in großen Mengen in einer zentimeterdicken Tonschicht, die in der Nähe von Gubbio in Italien zu Tage lag. Eine Überschlagsrechnung ergab schnell, dass die gemessene hohe Konzentration nicht durch das Iridium zu erklären war, das mit dem kosmischen Staub tagtäglich auf die Erde niederregnet. Aus seiner Menge schlossen die Wissenschaftler, es müsse sich um den Fallout einer Explosion handeln, hervorgerufen durch den Einschlag eines Asteroiden mit zehn bis vierzehn Kilometer Durchmesser.

Noch faszinierender war das Alter der Tonschicht: 65 Millionen Jahre. Exakt damals, am Ende der Kreidezeit, verschwanden die Dinosaurier von unserem Planeten. Daraus schlossen die Forscher aus Berkeley, dass der Einschlag eines großen Asteroiden die einstigen Beherrscher der Welt ausgelöscht habe – und dass ähnliche Ereignisse möglicherweise auch für die anderen massenhaften Ausrottungen von Lebewesen während der letzten 600 Millionen Jahre verantwortlich wären.

Vor zwanzig Jahren sorgte diese kühne, ja ketzerische These für Aufsehen; denn die meisten Paläontologen machten erhöhte Vulkanaktivität für den Untergang der Dinosaurier verantwortlich. Zudem glaubten sie nicht an ein plötzliches Aussterben der „schrecklichen Echsen“, sondern an einen allmählichen Niedergang. Vater und Sohn Alvarez lösten mit ihrer neuen Sicht intensive Debatten aus und sorgten dafür, dass Gesteine aus der Kreidezeit auf der ganzen Welt genauer unter die Lupe genommen wurden.

Diese gründliche Untersuchung brachte drei weitere Indizien für einen Asteroideneinschlag ans Licht, die von dramatischen Vorgängen am Erdboden und im Pflanzenreich kündeten: winzige Glaskügelchen, mit Rissen und Brüchen durchsetzte („geschockte“) Quarzkristalle und hohe Konzentrationen an Ruß. 1981 entdeckte Jan Smit von der Freien Universität Amsterdam mikroskopisch kleine Tröpfchen aus glasartig erstarrter Gesteinsschmelze. Seiner Meinung nach waren sie entstanden, als beim Aufschlag eines Asteroiden schmelzendes Gestein in die Luft geschleudert wurde, wo es zersprühte, rasch abkühlte und in Form feiner Tröpfchen wieder erstarrte. Drei Jahre später erklärten Bruce Bohor und seine Kollegen vom US Geological Survey auch die Brüche in den Quarzkristallen als Folge des gewaltsamen Aufpralls eines Asteroiden. Auf der Erde treten nur sehr selten Kräfte auf, die imstande sind, dieses äußerst stabile Mineral zu verformen, das selbst die hohen Temperaturen und Drücke tief im Innern der Erdkruste heil übersteht.



Die Hinweise auf Meteoriteneinschläge als Verursacher von Massensterben mehren sich

Als die winzigen Glastropfen und zerrütteten Quarzkristalle als Einschlagspuren gedeutet wurden, machte die Mehrheit der Wissenschaftler noch extremen Vulkanismus für beide Phänomene verantwortlich. Doch können gewaltige Eruptionen zwar Quarzkörner zerbrechen, aber nur in einer Richtung und nicht in mehreren wie bei Bohors Proben. Außerdem enthielten die erstarrten Gesteinströpfchen Spurenelemente, die sich deutlich von denen bei Vulkanausbrüchen unterschieden. Seit den 1980er Jahren fanden Wissenschaftler in Schichten vom Ende der Kreidezeit weltweit an mehr als dreißig Stellen geschockten Quarz und an mehr als hundert Orten erhöhte Iridium-Werte.

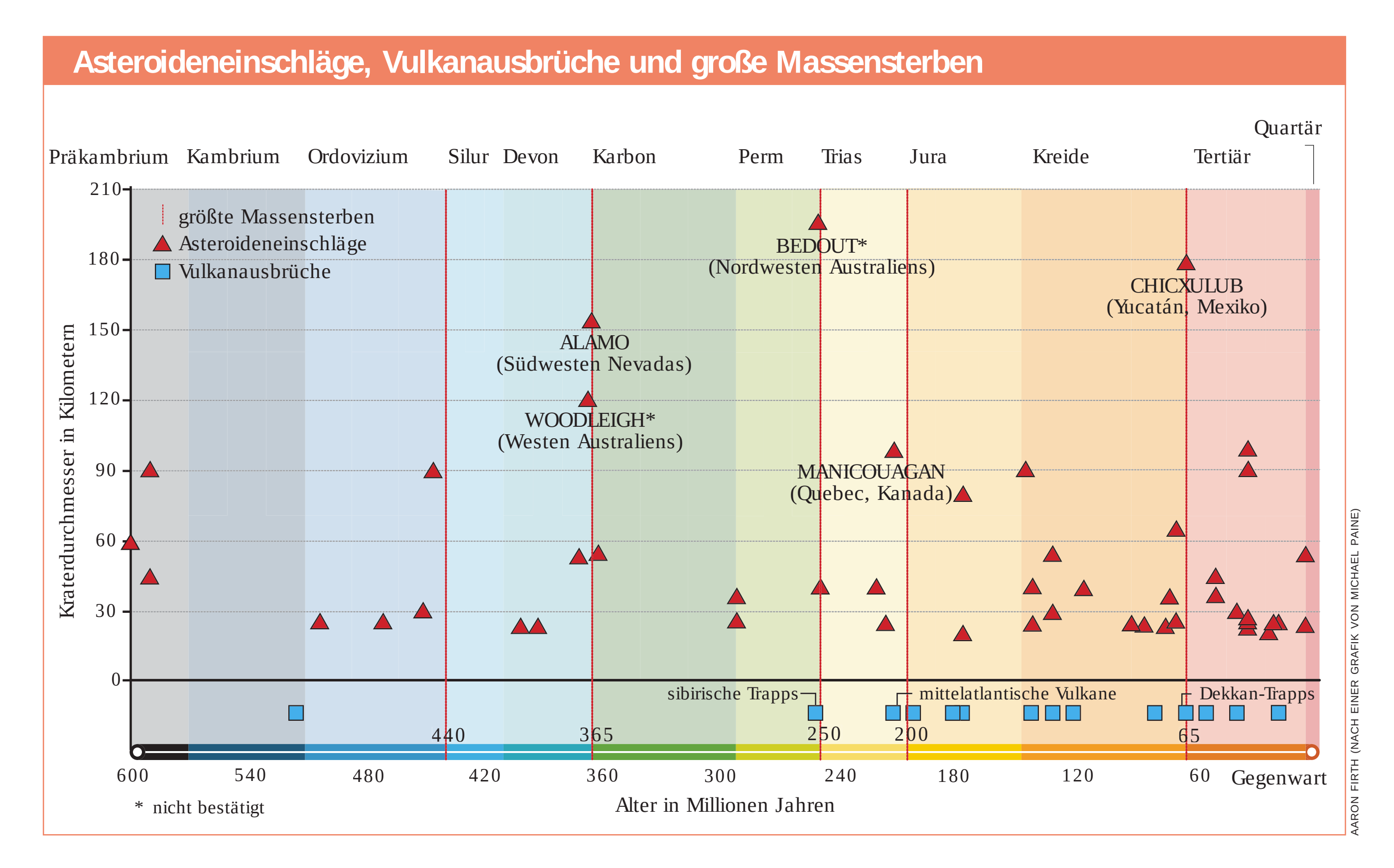
Am wenigsten umstritten war das dritte neu entdeckte Einschlagmerkmal: Ruß und Asche als Folge der beim Aufschlag ausgelösten Brände. Die Konzentration dieser Teilchen erreichte mehr als das Zehntausendfache normaler Werte.

Der überzeugendste letzte Puzzle-Stein im Asteroiden-Szenario am Ende der Kreidezeit war jedoch die Entdeckung des Einschlagtrichters selbst. Er liegt im Bereich der mexikanischen Halbinsel Yucatán und ist heute unter dem Namen Chicxulub-Krater bekannt. Schon kurz nachdem Vater und Sohn Alvarez 1980 ihre These verkündet hatten, berichteten der Geophysiker Tony Camargo von der Nationalen Mexikanischen Ölgesellschaft Pemex und Glen Penfield von der Firma Carson Services in Pennsylvania von einem riesigen kreisförmigen Gebilde, auf das sie bei der Suche nach neuen Öl- und Gasvorkommen im Golf von Mexiko gestoßen waren. Andere Wissenschaftler bestätigten 1991 die Existenz dieses Kessels und schätzten seinen Durchmesser auf fast 200 Kilometer.

Das Auffinden eines überzeugenden Kandidaten für den gesuchten Einschlagkrater bedeutete einen Wendepunkt. Immer mehr Wissenschaftler, die nach den Gründen für extreme Klimaschwankungen und Massenextinktionen in der Erdgeschichte suchten, wandten ihren Blick nun weg von irdischen Ursachen wie Vulkanausbrüchen und hin zu katastrophalen Treffern aus dem All. Zwar wer-

IN KÜRZE

- In den letzten 600 Millionen Jahren sind mehr als sechzig Meteoriten mit Durchmessern über fünf Kilometer auf die Erde gestürzt. Selbst die kleinsten erzeugten noch hundert Kilometer breite Krater.
- Die meisten Wissenschaftler sind heute davon überzeugt, dass ein solcher Einschlag die Dinosaurier auslöschte. Bisher gab es jedoch keine klaren Belege dafür, dass auch andere Massenextinktionen mit dem Aufprall eines Asteroiden oder Kometen zusammenfielen.
- Inzwischen stoßen Forscher auf immer mehr Spuren solcher Einschläge – wie geschockte Quarzkristalle und Fullerene – in Gesteinsschichten aus Epochen, in denen die fünf schlimmsten Artensterben stattfanden. Bei der verheerendsten Massenextinktion gingen neunzig Prozent aller existierenden Spezies zu Grunde.



den in beiden Fällen riesige Mengen von Schadstoffen wie Asche, Schwefel- und Kohlendioxid in die Atmosphäre geschleudert, was Klima und Umwelt massiv beeinträchtigt. Der große Unterschied besteht jedoch im zeitlichen Ablauf. Das urplötzliche Freisetzen schädlicher Substanzen beim Aufprall eines Asteroiden dürfte zu einem biologischen Kahlschlag binnen weniger Jahrtausende führen. Bei intensivem Vulkanismus entweichen die Giftgase dagegen über Millionen von Jahren hinweg, was den Organismen und ihren Lebensräumen eine wesentlich längere Galgenfrist verschafft.

Aus diesem Grund favorisierten Paläontologen zunächst die Vulkanismustheorie; denn in der fossilen Überlieferung scheinen Arten nicht von heute auf morgen zu verschwinden. Doch schon 1983 deuteten Philip Signor von der Universität von Kalifornien in Davis und Jere Lipps von Berkeley diesen Eindruck eines allmählichen Aussterbens als Folge einer verzerrten Wahrnehmung. Sie entstehe, weil Paläontologen bei der Ermittlung des letzten Auftretens einer bestimmten Spezies die Unvollständigkeit der fossilen Überlieferung und die Besonderheiten des Fossiliensammelns außer Acht ließen. Dadurch würde das Todesdatum von Spezies oft zu früh angesetzt.

Viele Forscher führten daraufhin zeitlich hochaufgelöste Untersuchungen an mehreren Arten durch, um statistisch verlässlichere Abschätzungen zu erhalten. Diese zeigten, dass die tatsächlichen Spannen für das Artensterben am Ende der Kreidezeit wie auch des Perms nur Jahrtausende statt Jahrmillionen betrugen, was nach geologischen Maßstäben extrem kurz ist. Zwar gab es intensiven Vulkanismus, und die von ihm bewirkte Klimaänderung trug zum Untergang einiger Arten bei. Aber das Leben begann sich bereits wieder zu erholen, bevor die Eruptionsphase abgeklungen war – ein klares Argument für die Einschlaghypothese.

Außerirdische Trittbrettfahrer

Die Erkenntnis, dass auch das Große Sterben in einem sehr kurzen Zeitraum stattfand, brachte einige Wissenschaftler dazu, nach dazu passenden Einschlagspuren und Kratern zu suchen. Tatsächlich gab es in den frühen 1990er Jahren wissenschaftliche Berichte über Funde von Iridium und geschocktem Quarz in Gesteinen vom Ende des Perms; allerdings betrugen die Konzentrationen nur ein Zehntel bis ein Hundertstel der Werte in den Tonschichten vom Ende der Kreidezeit. Daraufhin erklärten einige Paläontologen, der Asteroideneinschlag, der das Zeitalter der Saurier beendete, sei genauso einzigartig gewesen wie die Tiere selbst.

Andere Wissenschaftler urteilten dagegen nicht so vorschnell und gaben zu bedenken, dass die Gesteine am Ende des Perms vielleicht nicht dieselben Indikatoren in den gleichen Mengen bewahrt hätten wie die Proben am Übergang von der Kreidezeit zum Tertiär. Ein Grund dafür könnte sein, dass die irdischen Landmassen damals in einem Superkontinent namens Pangäa vereinigt waren, dem der Superozean Panthalassa gegenüberstand. Ein Asteroid oder Komet, der auf den tiefen Ozean träfe, sollte keinen geschockten Quarz erzeugen; denn zum einen würde der Aufprall durch das Wasser gemildert, und zum anderen ist Quarz in ozeanischer Kruste selten. Desgleichen dürfte der Asteroid beim Aufprall im Wasser nicht komplett schmelzen oder verdampfen und sein Material in die Atmosphäre schleudern. Mithin gäbe es auch keinen weltweiten Iridium-Regen. Bei einem Einschlag im Meer müsste man folglich nach anderen Indikatoren suchen.

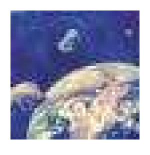
Einer davon, der schließlich in Meteoriten und zwei Einschlagkratern auftauchen sollte, ergab sich aus der zufälligen Entdeckung einer neuen Form von Kohlenstoff. Im zweiten Jahr meiner Doktorarbeit an der Scripps Institution of Oceanography in La Jolla in Kalifornien zeigte mir mein Doktorvater, der Geochemiker Jeffrey Bada, einen gerade im Scientific American erschienenen Artikel (Spektrum der Wissenschaft 12/91, S. 88). Er berichtete über die Entdeckung einer neuen Form von Kohlenstoff. ▶

Dabei handelte es sich um geschlossene Käfige aus Kohlenstoffatomen, die nach Richard Buckminster Fuller, dem Erfinder der geodätischen Kuppelbauten, Fullerene getauft wurden. Eine Gruppe von Astrophysikern und Physikochemikern hatte sie 1985 unabsichtlich in winzigen Mengen erzeugt, als sie die Bildung von kohlenstoffhaltigem „Sternenstaub" experimentell nachahmen wollte – und erhielt dafür 1995 den Chemienobelpreis. Weitere Experimente zeigten, dass Fullerene im Unterschied zu Grafit und Diamant, den beiden anderen Modifikationen von Kohlenstoff, in einigen organischen Lösungsmitteln löslich sind – eine Eigenschaft, mit deren Hilfe man sie schließlich in reiner Form gewinnen und ihre Existenz beweisen konnte.

Wie das Iridium gelangt der kohlenstoffhaltige Sternenstaub durch Asteroiden, Kometen und einen ständigen Regen kosmischer Teilchen auf die Erde. Deshalb beschlossen wir, in irdischen Sedimenten nach den exotischen Kohlenstoffkäfigen zu suchen. Wir wählten eine bekannte Einschlagstelle, den 1,85 Milliarden Jahre alten Sudbury-Krater in der kanadischen Provinz Ontario. Er ist mit einer einzigartigen kohlenstoffreichen „Brekzie" ausgekleidet: einer Mixtur aus zerschmettertem Ursprungsgestein und Material aus dem Fallout der Explosion. Ähnlich wie beim Chicxulub-Krater ließ sich auch hier die Mehrheit der Wissenschaftler erst davon überzeugen, dass es sich um einen Einschlagtrichter und nicht um eine vulkanische Erscheinung handelt, als geschockte Quarzkristalle und so genannte Schmetterkegel (Shattercones) entdeckt wurden. Das sind kegelförmige Strukturen, die man als im Gestein gefangene Stoßwellen bezeichnen könnte.

Da Fullerene reine Kohlenstoffmoleküle sind, hielten wir die kohlenstoffreiche Brekzie von Sudbury für ein viel versprechendes Ausgangsmaterial zur Suche danach. Und so machten wir uns 1993 daran, in dem Krater Proben zu sammeln. Aus diesen konnte ich, indem ich die besonderen Löslichkeitseigenschaften der Fullerene ausnutzte, im Labor tatsächlich die stabilsten Vertreter der Käfigmoleküle isolieren: diejenigen mit 60 oder 70 Kohlenstoffatomen. Hatten sie als blinde Passagiere mit dem Himmelskörper die Erde erreicht und den katastrophalen Aufprall überlebt oder waren sie erst in der Hitze und unter dem enormen Druck beim Aufprall gebildet worden? Diese Frage galt es als Nächstes zu klären.

Eine Möglichkeit dazu hatten kurz zuvor der organische Chemiker Martin Saunders und seine Kollegen an der Yale-Universität in New Haven (Connecticut) sowie der Geochemiker Robert Poreda von der Universität Rochester im US-Bundesstaat New York entdeckt. Der Test beruht auf der ungewöhnlichen Fähigkeit der Kohlenstoffkäfige, Edelgase wie Helium, Neon und Argon in ihrem Inneren einzuschließen. Als Bada und ich 1994 von dieser Entdeckung hörten, baten wir Poreda, unsere Fullerene von Sudbury zu untersuchen. Aus Messungen an Meteoriten und kosmischem Staub war bekannt, dass die Edelgase im All in einem anderen Isotopengemisch vorkommen als auf der Erde. Um festzustellen, woher unser exotischer Kohlenstoff stammte, brauchten wir also nur das Mengenverhältnis zwischen den Atomsorten unterschiedlicher Masse bei den eingefangenen Gasen zu untersuchen.



Fußball-Moleküle mit Edelgasen außerirdischer Herkunft belegen die Einschlagtheorie

Himmlische Käfigmoleküle

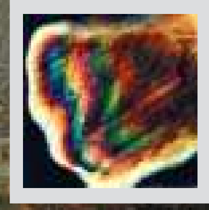
Was wir fanden, erstaunt uns noch heute: Die Sudbury-Fullerene enthielten Helium mit derselben Isotopenverteilung, wie sie in einigen Meteoriten und in kosmischem Staub vorkommt. Offenbar hatten die Moleküle den katastrophalen Aufprall überlebt, aber wie? Geologen sind sich einig, dass der Asteroid von Sudbury einen Durchmesser von mindestens acht Kilometern gehabt haben muss. Computersimulationen zufolge sollten alle organischen Verbindungen in einem Objekt dieser Größe beim Aufprall verdampfen. Ein weiterer heikler Punkt war, dass es zunächst keine überzeugenden Hinweise darauf gab, dass Meteoriten überhaupt Fullerene enthalten.

Den möglichen Grund dafür glaubten wir allerdings zu kennen: Es war nicht nach allen bekannten Typen von Kohlenstoffkäfigen gesucht worden. Bei dem astrophysikalischen Experiment zur Simulation der Entstehung von Sternenstaub hatte sich zusätzlich zu den Molekülen mit 60 und 70 Atomen eine Familie von größeren Fullerenen gebildet. Als ich spaßeshalber solche größeren Exemplare in einigen kohlenstoffreichen Meteori- ▶

Bleibende Spuren

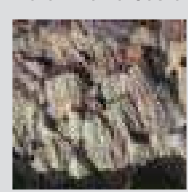
Krater sind der beste Beweis für einen Asteroideneinschlag, aber das bei der Explosion in die Atmosphäre geschleuderte Material enthält weitere Zeugnisse des Aufpralls, die auf die Erde herabsinken und im Sedimentgestein über Jahrmillionen erhalten bleiben können. Solche Einschlags-Tracer findet man vor allem nach katastrophalen Kollisionen wie der hier abgebildeten. In diesem hypothetischen Szenario prallt ein Asteroid mit zehn Kilometern Durchmesser in Küstennähe auf die Erde. Dabei entstehen Temperaturen von mehreren tausend Grad und Drücke vom Millionenfachen des normalen Atmosphärendrucks.

Geschockte Mineralien



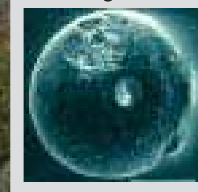
Extremer Druck und sehr hohe Temperaturen zerrütten Quarzkristalle (links) und transformieren Eisen-Nickel-Siliziumdioxid-Körner.

Deformierte Gesteine



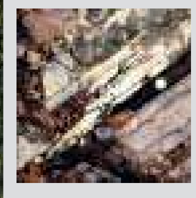
Stoßwellen werden im Gestein als Schmetterkegel (links) „eingefroren". Das Grundgestein bricht; ausgeworfener grober Schutt verbackt zu Brekzien.

Mikrokügelchen



Geschmolzenes Gestein, das beim Einschlag in die Atmosphäre spritzt, erstarrt beim raschen Abkühlen zu feinen Glastropfen.

Iridium



Dieses auf Erden seltene Element, das in manchen Meteoriten hoch angereichert ist, kann in einer Tonschicht aus dem Fallout erhalten bleiben.



Unmittelbare Verwüstungen

Himmelhohe Fontänen

Die Explosion wirft etwa 21000 Kubikkilometer Schutt aus und katapultiert 1700 Kubikkilometer davon mit gut fünfzigfacher Schallgeschwindigkeit in die obere Atmosphäre.

Verfinsterte Sonne

Mehrere Monate lang blockiert der ausgeworfene feine Staub das Sonnenlicht, ehe er schließlich vom Regen ausgewaschen wird. Dadurch sinken die Temperaturen bis zu einem halben Jahr lang weltweit unter den Gefrierpunkt.

Killerwellen

Bis zu neunzig Meter hohe Flutwellen (Tsunamis) verwüsten an den Küsten Ökosysteme in einem Umkreis von hundert bis tausend Kilometern um den Einschlagsort.

Verheerende Erschütterungen

Ein Erdbeben der Stärke 13, eine Million Mal heftiger als das schlimmste je gemessene, erschüttert den Globus.

Schreckliche Nachwirkungen

Dieser hypothetische Einschlag reißt einen bis zu hundert Kilometer breiten und vierzig Kilometer tiefen Krater in den Boden und setzt unmittelbar riesige Mengen an Asche und klimaverändernden Schadstoffen wie Schwefel- und Kohlendioxid frei. Das führt binnen kürzester Frist zur Zerstörung der Umwelt und zum Untergang vieler Arten. Im Einklang damit zeigen kürzlich durchgeführte wissenschaftliche Untersuchungen, dass während der schlimmsten Massenextinktionen viele Tier- und Pflanzenarten innerhalb weniger tausend Jahre vom Erdboden verschwanden. Bei intensivem Vulkanismus werden dieselben Schadstoffe in ähnlichen Mengen ausgestoßen, aber verteilt über einen viel längeren Zeitraum, sodass sich die verheerenden Wirkungen erst im Laufe von Jahrmillionen bemerkbar machen.

Extraterrestrische Fullerene

„Fußbälle“ aus Kohlenstoff haben bei ihrer Bildung im All extraterrestrische Edelgase eingeschlossen und sind mit dem einschlagenden Meteoriten zur Erde gelangt.

Ruß und Asche

Großräumige Brände erzeugen Ruß, der sich in Ablagerungen auf das Zehntausendfache der normalen Mengen anreichert.

Gefährliche Geschosse

Die Suche nach Asteroiden auf Kollisionskurs

Von Sarah Simpson

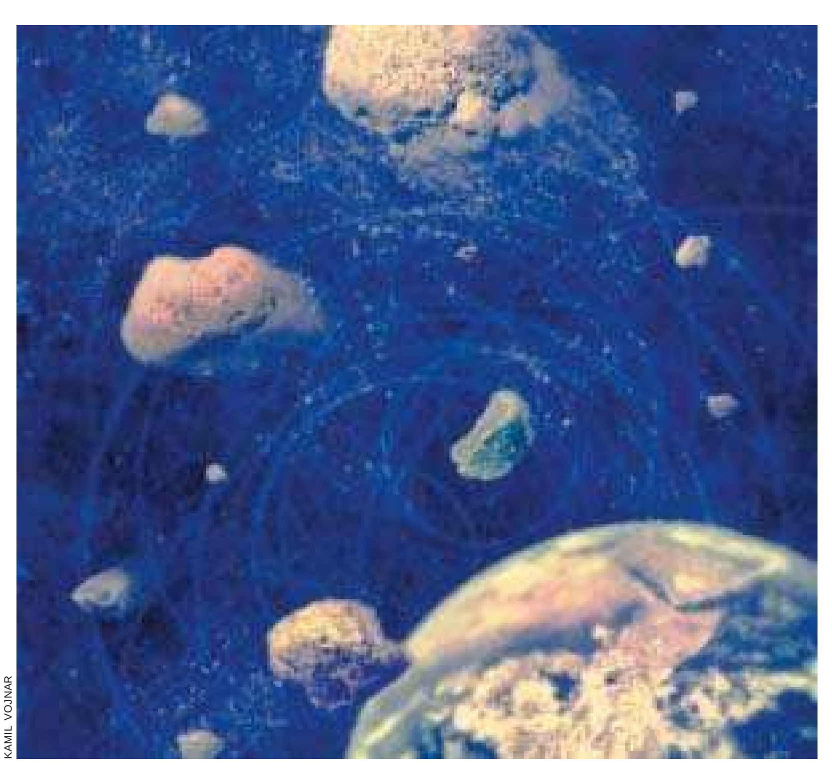
Am 7. Januar dieses Jahres brachte uns ein Felsstück von der Größe eines Einkaufszentrums wieder einmal in Erinnerung, wie voll es im Sonnensystem eigentlich ist. Mit seinen rund 300 Metern Durchmesser war der Asteroid 2001 YB5 so klein, dass ihn bis Ende Dezember niemand bemerkt hatte – aber groß genug, um einen Krater vom Umfang einer Kleinstadt zu erzeugen, wäre er auf der Erde eingeschlagen. Zum Glück kam er unserem Planeten nicht näher als 830 000 Kilometer (gut die doppelte Entfernung zum Mond), und zumindest für die nächsten Jahrhunderte droht uns keine Gefahr von ihm.

Aber was ist mit den 1500 anderen bekannten erdnahen Kleinplaneten? Sie sind aus dem Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter ausgebrochen und schwirren nun als potenzielle kosmische Bomben um uns herum. YB5 war da kein Sonderfall. Weltall-Trümmer von seinem Kaliber kommen fast jedes Jahr der Erde bedrohlich nahe, meint David Morrison vom Ames-Forschungszentrum der Nasa in Mountain View (Kalifornien). Einen Treffer gibt es aber nur alle 20 000 bis 30 000 Jahre.

Gefährliche Objekte zu finden, lange bevor sie zu einer Bedrohung werden, ist das Ziel des neuen britischen Informationszentrums für erdnahe Objekte, das im April am National Space Science Centre im englischen Leicester seine Arbeit aufgenommen hat. Die Asteroid-Jäger dort und bei einer Hand voll anderer Institutionen auf der Welt beschäftigen sich vor allem mit Objekten ab einem Kilometer Durchmesser. Das ist die Untergrenze, ab der beim Aufprall mit globalen Zerstörungen zu rechnen ist.

Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein solcher Asteroid in den nächsten hundert Jahren einschlägt, schwankt zwischen 1:4000 und 1:8600. Das hat Alan Harris vom Jet Propulsion Laboratory der Nasa kürzlich errechnet. Eine genauere Prognose erwartet die amerikanische Raumfahrtbehörde von ihrem Spaceguard Survey Program. Es zielt darauf ab, neunzig Prozent der Asteroiden aufzuspüren, die mehr als einen Kilometer Durchmesser haben und sich auf Kollisionskurs mit der Erde befinden.

Sarah Simpson ist Redakteurin bei Scientific American.



KAMIL VOJNAR

ten zu isolieren versuchte, fand ich ein ganzes Sortiment davon mit bis zu 400 Kohlenstoffatomen. Und wie ihre kleineren Gegenstücke aus dem Sudbury-Krater enthielten sie extraterrestrisches Helium, Neon und Argon!

Nach diesem ermutigenden Test beschlossen Poreda und ich, unsere neue Methode an Sedimenten zu prüfen, die mit Massensterben in Verbindung stehen. Zuerst nahmen wir uns Fullerenproben, die in Ablagerungen vom Ende der Kreidezeit entdeckt worden waren, noch einmal vor. Eine Arbeitsgruppe unter Leitung von Dieter Heymann von der Rice-Universität in Houston (Texas) hatte den exotischen Kohlenstoff als Teil des Rußes interpretiert, der sich im Gefolge der massiven Brände nach dem Aufprall ansammelte. Die Hitze eines solchen Feuers mag ja intensiv genug gewesen sein, um den pflanzlichen Kohlenstoff in Fullerene umzuwandeln. Allerdings konnte sie das außerirdische Helium nicht erklären, das wir in den Käfigen fanden.

Durch diesen neuerlichen Erfolg ermutigt, trauten wir uns schließlich an geologische Schichten heran, die mit dem Großen Sterben verknüpft sind und bei denen es bisher keinen Beweis dafür gab, dass sie von einem Asteroideneinschlag herrühren. Und wieder wurden wir fündig. Im Februar 2001 konnten wir über extraterrestrisches Helium und Argon in Fullerenen aus Gesteinsproben des späten Perms in China und Japan berichten. In den letzten Monaten haben wir damit begonnen, analoge Formationen in der Antarktis näher zu betrachten. Vorläufige Tests mit Proben von der dortigen Fossilfundstätte Graphite Peak waren positiv. Die gefundenen Fullerene mit außerirdischem Helium und Argon sind an diesem Ort vergesellschaftet mit geschockten Quarzkristallen, einem weiteren direkten Indikator eines Asteroideneinschlags.

So sehr uns diese Ergebnisse begeisterten, wäre es noch verfrüht, darin den eindeutigen Beweis dafür zu sehen, dass ein Asteroideneinschlag das Große Sterben auslöste. Viele Wissenschaftler halten Vulkanismus immer noch für die wahrscheinlichere Ursache. Sie stören sich einfach daran, dass in Gesteinen, die zeitlich zum Großen Sterben gehören, geschockte Quarzkristalle und Iridium relativ selten sind, und sie werden skeptisch bleiben, solange kein Einschlagkrater gefunden wird.

Einen guten Kandidaten dafür gibt es allerdings schon. Er könnte unter einer dicken Sedimentschicht vor der Nordwestküste Australiens verborgen sein. Aus einem seismischen Profil des dortigen Meeresbodens hat der Geologe

John Gorter von der Firma Agip Petroleum in Perth (Australien) eine kreisförmige Struktur mit einem Durchmesser von 200 Kilometern herausgelesen, die den Namen Bed-out erhielt. Es bleibt abzuwarten, ob die Entdeckung von geschocktem Quarz und anderen Einschlagspuren die Vermutung erhärtet, dass es sich hier um Ground Zero einer kosmischen Bombe mit verheerenden Folgen für das irdische Leben handelt. Wenn ja, würde die geografische Lage auch erklären, warum Fullerene in China, Japan und der Antarktis gefunden wurden, nicht aber an entfernteren Stellen wie in Ungarn oder Israel.

Ermutigend sind auch kürzlich entdeckte weitere Tracer, die als direkte Produkte eines Einschlags gelten können. Im September 2001 berichteten Kunio Kaiho und seine Kollegen von der Tohoku-Universität in Sendai (Japan) über Eisen-Siliziumdioxid-Nickel-Kristallkörner mit Spuren eines heftigen Einschlags in Gesteinen aus der Meishan-Formation in China, die vom Ende des Perms stammen. In ihnen waren schon vorher extraterrestrische Fullerene sowie Anzeichen für ein plötzliches Artensterben entdeckt worden. Ähnliche Kristallkörner hatten Forscher auch bei Einschlagstellen vom Ende der Kreidezeit rund um die Welt gefunden.



Jäher Wandel der Umwelt

Aber selbst wenn die Suche nach Kratern oder anderen direkten Beweisstücken vergeblich bleibt, besteht immer noch die Möglichkeit, einen Asteroideneinschlag aus Folgewirkungen wie einem jähen Wandel der Umweltbedingungen oder der Flora und Fauna abzuleiten. So berichteten Peter Ward und seine Kollegen an der Universität von Washington in Seattle letzten Sommer von einem abrupten Aussterben eingewurzelter Pflanzen in Gesteinen des südafrikanischen Karoo-Beckens, die vom Ende des Perms stammen.

Ein halbes Dutzend Forschergruppen hat auch einen scharfen Abfall in der Produktivität des Meeresplanktons beschrieben, der zeitlich mit dem Großen Sterben zusammenfällt – ebenso mit der dritten der fünf großen Massenextinktionen in etwa 200 Millionen Jahre alten Gesteinen vom Ende der Trias. Diese Produktivitätseinbrüche lassen sich an einer Veränderung im Mengenverhältnis der Kohlenstoffisotope erkennen. Sie finden sich ähnlich auch am Ende der Kreidezeit, von dem nur noch wenige Wissenschaftler bezweifeln, dass damals ein verheerender Asteroideneinschlag stattfand.

Letztlich können nur weitere sorgfältige Untersuchungen zeigen, ob die neuen Einschlags-Tracer – seien es direkte Produkte einer Kollision oder indirekte Hinweise auf abrupte ökologische Veränderungen – wirklich verlässlich sind. Bisher haben sich bei drei der fünf großen biologischen Krisen auf unserem Planeten verschiedenartige Indizien für den Aufprall eines Himmelskörpers in Gesteinen aus der jeweiligen Epoche gefunden.

Auch im Falle der beiden anderen Massenextinktionen – eine vor ungefähr 440 und die andere vor 365 Millionen Jahren – liegen Berichte einzelner Forscher über geschockten Quarz, glasartige Mikrokügelchen, potenzielle Krater und einen Produktivitätseinbruch vor; aber der Kausalzusammenhang zwischen einem Asteroideneinschlag und dem Artensterben ist hier noch nicht zwingend. Allerdings sollte man sich im Klaren darüber sein, dass Einschlags-Tracer, die am Ende der Kreidezeit ins Auge springen, in Gesteinsformationen, die zu älteren Massensterben gehören, allein wegen des größeren zeitlichen Abstandes wahrscheinlich viel weniger gut erhalten sind.

Dass Kollisionen mit Kometen oder Kleinplaneten mehrfach in der Erdgeschichte große Teile des Lebens ausgelöscht haben könnten, ist und bleibt eine aufregende Idee. Sie wird noch faszinierender durch die wachsenden Hinweise darauf, dass solche verheerenden Ereignisse offenbar für den Fortgang der Evolution nötig waren. Die meisten Paläontologen glauben zum Beispiel, dass das Große Sterben den Dinosauriern zu ihrer großen Verbreitung verhalf, indem es ihnen ökologische Nischen zugänglich machte, die andere Lebewesen zuvor eingenommen hatten. Genauso ermöglichte der Untergang der Riesenechsen den Aufstieg der Säugetiere.

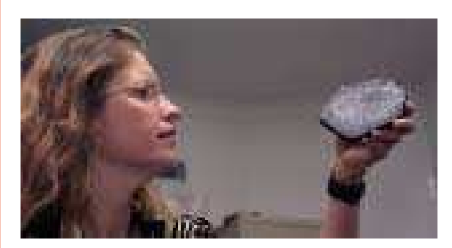
Was immer diese Massenextinktionen ausgelöst haben mag, hat also letztlich auch den Grundstein unserer eigenen Existenz gelegt. Indem Forscher immer mehr Einschlags-Tracer auf der ganzen Welt aufspüren, hoffen sie, endlich die Schuldigen für die größten und geheimnisvollsten Mordfälle der Geschichte des Lebens auf der Erde zu überführen.

Literaturhinweise

Impact Event at the Permian-Triassic Boundary: Evidence from Extraterrestrial Noble Gases in Fullerenes. Von Luann Becker et al. in: Science, Bd. 291, S. 1530, 23.2.2001.

Accretion of Extraterrestrial Matter throughout Earth's History. Von Bernhard Peucker-Ehrenbrink und Birger Schmitz (Hg.). Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001.

Weblinks finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft".*



Luann Becker *begann ihre Karriere als Geochemikerin 1990 an der Scripps Institution of Oceanography in La Jolla (Kalifornien). 1998 nahm sie an einer Expedition in die Antarktis zum Sammeln von Meteoriten teil und erhielt im Juli 2001 die Antarctic Service Medal der National Science Foundation der USA. Im folgenden Monat wurde sie Dozentin an der Universität von Kalifornien in Santa Barbara. Diesen Sommer sucht sie mit Kollegen in Gesteinen vom Ende des Perms, als das schlimmste Artensterben der Erdgeschichte stattfand, nach Spuren eines Meteoriteneinschlags.*



Entwaldung stört Klima

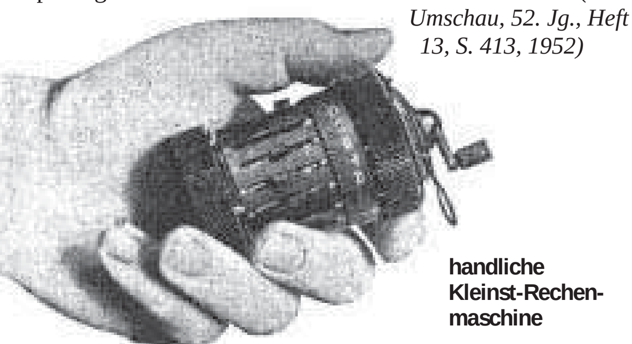
Die alten Kulturländer Persien, Palästina, Griechenland, Sizilien, Spanien sind seit ihrer Entwaldung … verödet, und zwar … durch die ungünstige Verteilung der Regenfälle auf die Jahreszeiten. Da der Einfluß des Waldes auf … Vermehrung der verschiedenen Niederschlagsformen im Sommer am größten ist, bewahrt er seine Umgebung gerade zu jener Zeit vor Austrocknung. Auf waldlosem Gebiete hingegen werden … sehr häufig die weniger wasserbeladenen Wolken nicht zu Niederschlägen veranlaßt, und so beginnt die regenlose Zeit früher und endet später … Die Verlängerung der Dürreperioden ist also eine … verhängnisvolle Wirkung der Entwaldungen und könnte durch Wiederbewaldung behoben werden. *(Naturwiss. Rundschau, 5. Jg., Heft 7, S. 294, 1952)*

Höhere Krebssterblichkeit durch Teerstraßen?

Die Straßendecke geteerter Straßen enthält erhebliche Mengen an gesundheitsschädlichem Benzpyren, das mit dem durch den Verkehr abgeriebenen und zermahlenen Staub in die Luft und somit auch in die Atmungsorgane der Straßenbenutzer gelangt. Da das Benzpyren selbst wie auch der Teer in seiner Gesamtheit … krebserregend wirkt, könnte in der zunehmenden Teerverwendung im Straßenbau in der Tat eine der Ursachen für die zunehmende Krebssterblichkeit zu suchen sein. Hierüber können statistische Untersuchungen an Menschen, die in der Nähe von Teerstraßen wohnen, und solchen, die in teerstraßenfreien Gegenden beheimatet sind, sicherlich bald Aufschluß geben. *(Chemiker-Zeitung, 76. Jg., Nr. 19, S. 488, 1952)*

Echte Kleinst-Rechenmaschine zum Kurbeln

Die „Curta“ genannte Universalrechenmaschine ist so klein und leicht gebaut (230 g), daß sie in der Hand eines erwachsenen Menschen Platz findet. Trotzdem stellt sie eine vollwertige, leistungsfähige, dazu sogar geräuschlos arbeitende Vierspeziesmaschine dar. Die kleine Curta hat Zehnerübertragung auf beiden Zählwerken und gestattet infolgedessen schnellste Rechenoperationen durch Einsparungen von Kurbelumdrehungen. … Die eingestellten Zahlen in der Größe üblicher Druckschrift sind zur Überwachung in den Fenstern übersichtlich ablesbar. Da die Maschine so handlich und leicht ist, kann sie zum Einstellen und Ablesen in die günstigste Entfernung gebracht werden, womit Irrtümer weitgehend ausgeschaltet sind. Die Curta bildet tatsächlich unter den Rechenmaschinen eine Klasse für sich. *(Die Umschau, 52. Jg., Heft 13, S. 413, 1952)*



handliche Kleinst-Rechenmaschine



Personenschutz im Verkehr

Eine neue Schutzvorrichtung für elektrische Strassenbahnwagen ist seit einiger Zeit bei der Breslauer Strassenbahn versuchsweise eingeführt und hat sich bisher ausgezeichnet bewährt. Die Vorrichtung … besteht aus einer Art Bürste, deren Leiste am Vorderperron angebracht ist, während die Borsten bis auf wenige Zentimeter über dem Strassenpflaster hinabgehen. Die Borsten bestehen aus sieben Reihen elastischer Stäbe von spanischem Rohr, die dicht nebeneinander gestellt sind … Trifft die Bürste einen auf das Geleise gefallenen Körper, so können wohl einige Gliedmassen unter die Borsten geraten, niemals aber der ganze Körper. Dieser erhält höchstens einen elastischen Stoss, der nicht allzu gefährlich werden kann. Aber auch schwere Verletzungen … erscheinen ausgeschlossen. *(Die Umschau, VI. Jg., No. 30, S. 594, 1902)*



Schutzbürste an Straßenbahnen

Welchen Weg nimmt das Wasser?

Daß der in den Appenzeller Bergen gelegene Sämbtisersee einen unterirdischen Abfluß besitzen müsse, ging aus der Erscheinung hervor, daß sich der Seespiegel nach starkem Regen stärker senkte, als die bloße Verdunstung des Wassers verursachen konnte. Um sich Gewißheit zu verschaffen, wurde … eine große Quantität grünen Farbstoffes zugeführt. An den Quellen der Umgebung … wurden Wachen aufgestellt und die Bevölkerung veranlaßt, … zu berichten, sobald eine der Wasseradern die grüne Färbung ausweise. Das ist nun geschehen, indem der Mühlbach … im oberen Rheinthal während mehrerer Stunden Wasser mit der eigenthümlichen Farbe aufwies. *(Der Kulturtechniker, V. Jg., S. 46, 1902)*

Harn als photographischer Entwickler

Frischgelassener Harn ist ohne Einwirkung auf das latente Bild einer photographischen Platte. Sobald der Harn jedoch durch Kaliumkarbonat alkalisch gemacht wird, bringt er das Bild schnell zur Entwickelung. In gleicher Weise wirkt durch Fäulnis alkalische gewordener Harn. Es beruht dies darauf, dass gesunder Harn keine reduzierenden Substanzen enthält … Das mit Harn entwickelte Bild … bleibt aber so schwach, dass nur … ein leidlicher Abdruck hergestellt werden kann. Ein beruhigender Umstand für die Industrie photographischer Entwickler! *(Die Umschau, VI. Jg., No. 30, S. 616, 1902)*

Auf den folgenden Seiten finden Sie das aktuelle Journal der Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz.
Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

Extrem intensive Laserblitze

Kompakte Laborgeräte können heute Lichtpulse erzeugen, deren Intensität kurzzeitig der Leistung sämtlicher Kraftwerke auf der Erde gleichkommt. Solche gebündelten Laserblitze beschleunigen Elektronen über kürzeste Distanz fast auf Lichtgeschwindigkeit.

Von Gérard A. Mourou und Donald Umstadter

Seit jeher träumen Menschen davon, mit scharf gebündelten Lichtstrahlen spektakuläre Effekte zu erzielen. Angeblich setzte der antike Mathematiker Archimedes im Jahre 212 v. Chr. mit einem riesigen Spiegel die römische Flotte bei Syrakus in Brand. Zwar gehört diese Geschichte ins Reich der Legenden, doch hat in der Tat ein anderer Grieche, Diokles, um 200 v. Chr. mit dem Parabolspiegel das erste perfekt fokussierende optische Gerät erfunden. Zweitausend Jahre später ermöglichen Spiegel und die Effekte der Quantenmechanik die vielseitigste hochintensive Lichtquelle – den Laser.

Als Nonplusultra galt bis vor kurzem der Hochleistungslaser Nova, der am Lawrence Livermore National Laboratory von 1985 bis 1999 betrieben wurde. Er war eine der größten jemals gebauten Lichtschleudern – schon der Name sollte an die Leuchtkraft eines explodierenden Sterns erinnern. Ein neunzig Meter langes Gehäuse barg zehn parallele Ketten von Laserverstärkern; aus 180 Kilogramm schweren Glasblöcken gefertigte Spiegel lenkten die Strahlen auf Targets zur Kernfusion und anderen Experimenten. Um Überhitzung zu vermeiden – sowie wegen des enormen Energiebedarfs –, wurde Nova nur wenige Male pro Tag in Gang gesetzt.

Doch da Leistung bekanntlich Energie pro Zeiteinheit ist, lassen sich hohe Leistungen auch erzielen, indem eine bescheidene Energiemenge in einem extrem kurzen Zeitintervall freigesetzt wird. Ein Puls von Nova dauerte mit drei Nanosekunden (milliardstel Sekunden) im Vergleich zu heutigen ultraschnellen Lasern eher lange, und jeder Puls verbrauchte mehrere Kilojoule an Energie. Ein neuer Lasertyp, der bequem auf einen Labortisch passt, erbringt mit zehntausendfach verkürzter Pulsdauer so viel Leistung wie Nova (siehe „Ultrakurze Laserblitze“ von John-Mark Hopkins und Wilson Sibbett, Spektrum der Wissenschaft 11/2000, S. 66). Zum Beispiel erreicht ein Ultrahochleistungslaser, der nur ein Joule Energie in einen Puls von hundert Femtosekunden Dauer packt (eine Femtosekunde entspricht 10^{-15} Sekunden), eine Leistung von zehn Terawatt (Billionen Watt). Dies übertrifft die Gesamtleistung aller elektrischen Kraftwerke weltweit.

Die kompakten Laser können täglich hundert Millionen Pulse erzeugen und ihre Leistung auf tausendstel Millimeter große Punkte konzentrieren; dabei entstehen die höchsten Lichtintensitäten, die es auf Erden gibt – und zugleich die stärksten je erzeugten elektrischen Felder mit rund einer Billion Volt pro Zentimeter. Bei der Wechselwirkung solch intensiver Strahlung mit Materie werden im Labor die extremen physikalischen Bedingungen reproduziert, die sonst nur im Innern von Sternen oder in der Nachbarschaft Schwarzer Löcher herrschen: Temperaturen von 10^{10} Kelvin, Magnetfelder von 10^9 Gauss, Teilchenschleudern mit 10^{25}facher Erdbeschleunigung.

Da solche Laser nicht mehrere hundert Millionen, sondern nur eine Million Dollar kosten, werden Großforschungsprojekte auf einmal wieder normalen Universitätslabors und Ländern mit kleinem Forschungsetat zugänglich. In den letzten Jahren sind Dutzende solcher Systeme in aller Welt gebaut worden – für so unterschiedliche Forschungsgebiete wie Kern-, Astro- und Hochenergiephysik sowie Allgemeine Relativitätstheorie. Obwohl erst jüngst entstanden, hat die neue Lasertechnik schon praktische Verwendung gefunden, zum Beispiel als Röntgenlaser, ultrakompakte Teilchenbeschleuniger oder Präzisionsröntgengeräte für die Medizin; zu künftigen Anwendungen könnte Strahlentherapie bei Krebs oder Energiegewinnung aus Kernfusion gehören.

Ein Trick namens Chirping

In den ersten fünf Jahren nach Erfindung des Lasers im Jahr 1960 erreichten kompakte Laborgeräte zwar in mehreren technologischen Sprüngen Leistungen bis zu einem Gigawatt (Milliarden Watt), doch dann stagnierte diese Entwicklung zwanzig Jahre lang. Der einzige Weg zu mehr Leistung waren immer größere Laser. Beim Versuch, die Intensität hochzutreiben, entstanden unerwünschte nichtlineare Effekte, die die Strahlqualität minderten und sogar die Geräte beschädigten. Erst 1985 wurde dieses Problem umgangen, als einer von uns (Mourou) mit seinem Team die so genannte *Chirped Pulse Amplification* (CPA, etwa: Verstärkung gestreckter Pulse) einführte. Die Leistung kompakter Tabletop-Laser stieg danach sprunghaft um das Tausend- bis Zehntausendfache.

Mit Chirping (wörtlich „Zwitschern“) ist in der modernen Lasertechnik das zeitliche Dehnen eines Signals oder einer Welle gemeint. Zunächst erzeugt ein Oszillator einen kurzen Wellenpuls, der anschließend um das 10^3- bis 10^5fache auseinander gezogen wird (siehe Bild auf Seite 73). Dabei sinkt die ▶



Ein Laser-Tischgerät erzeugt pro Sekunde zehn Pulse mit Billionen Watt, die im Vordergrund auf ein dünnes Tuch treffen. Das Foto ist dreifach belichtet worden, um die unterschiedlichen Intensitäten wiederzugeben.

Pulsintensität um denselben Faktor. Nun kann der Puls einen üblichen Laserverstärker durchlaufen, ohne ihn zu beschädigen. Schließlich staucht ein robustes optisches Bauteil, etwa ein Paar von Beugungsgittern in einer Vakuumkammer, den Puls auf seine ursprüngliche Dauer zusammen – und erhöht die Pulsleistung auf das 10^3- bis 10^5fache der maximalen Verstärkerleistung.

Ein typischer Anfangspuls dauert hundert Femtosekunden und hat eine Energie von 0,2 Nanojoule (milliardstel Joule). Wir dehnen ihn um den Faktor 10^4 auf eine Nanosekunde – wobei seine Leistung von etwa zwei Kilowatt auf 0,2 Watt schrumpft – und verstärken ihn danach um zehn Größenordnungen auf zwei Joule und zwei Gigawatt. Durch Rekompression schrumpft die Pulslänge schließlich auf hundert Femtosekunden, und die Pulsleistung steigt auf zwanzig Terawatt. Der ursprüngliche 2-Kilowatt-Puls hätte den Verstärker zerstört – es sei denn, wir hätten den Querschnitt von Strahl und Verstärker um den Faktor 10^4 vergrößert. Erst das „Gezwitscher" der CPA-Technik ermöglicht die Verwendung herkömmlicher Laserverstärker und vermeidet störende nichtlineare Effekte.

Das hört sich einfacher an als es ist. Die meisten Geräte zur optischen Streckung und Kompression arbeiten nicht exakt linear, und der Puls wird verdorben, wenn Expander und Kompressor nicht perfekt abgestimmt sind.

Relativistische Optik

Dennoch wuchs in den 1990er Jahren die Lichtintensität durch verbesserte Pulskompression sowie durch die Entwicklung einer Korrekturoptik, die den Laserstrahl viel schärfer fokussiert. Diese Leistungssteigerungen öffneten den Zugang zur relativistischen Optik, einem Bereich mit ungewöhnlichen Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie, mit deren Hilfe das Licht Elektronen fast auf Lichtgeschwindigkeit zu beschleunigen vermag. Ohne CPA wäre dieser Bereich nur riesigen und teuren Lasersystemen zugänglich.

Die Optik beschreibt, wie Elektronen auf Licht reagieren. Das mag vielleicht nicht wie die gängige Definition klingen, bei der wir eher an die Reflexion von Lichtstrahlen an einem Spiegel oder die Brechung in Wasser denken. Doch alle optischen Eigenschaften eines Materials sind Folgen der Wechselwirkung seiner Elektronen mit Licht.

Licht ist eine Welle aus gekoppelten elektrischen und magnetischen Feldern, die mit hoher Frequenz synchron schwingen. Die beiden Felder oszillieren senkrecht zueinander sowie senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung (siehe Bild auf Seite 74). Wird ein Elektron von einer Lichtwelle getroffen, so verspürt es deren elektrisches Feld und beginnt zu schwingen, und zwar parallel zur Richtung des elektrischen Feldes und mit dessen Frequenz – aber nicht unbedingt in gleicher Phase: Je nach Art der Bindung des Elektrons an die Atome des Materials können die Elektronenschwingungen hinter der Lichtwelle herhinken oder ihr vorauseilen. Amplitude und Phase der Elektronenschwingung wiederum bestimmen, wie sich die Lichtwelle durch das Material fortpflanzt, und definieren somit dessen optische Eigenschaften.

In der klassischen Optik sind die Amplituden so klein, dass das Schwingungstempo der Elektronen stets weit unter Lichtgeschwindigkeit bleibt. Doch bei Laser-Intensitäten von mehr als 10^{18} Watt pro Quadratzentimeter nähert sich die Oszillationsgeschwindigkeit dieser prinzipiellen Obergrenze jeglicher Bewegung, und relativistische Effekte verändern das Verhalten der Elektronen grundlegend.

Erstens nimmt bei relativistischen Geschwindigkeiten die Masse des Elektrons merklich zu, wodurch Amplitude und Phase seiner Schwingungen verändert werden. Zweitens beginnt nun auch das magnetische Feld des Lichts eine Rolle zu spielen. Magnetfelder üben auf bewegte elektrische Ladungen Kräfte aus, doch im Geltungsbereich der klassischen Optik ist die Magnetkraft vernachlässigbar klein. Erst wenn die Elektronen fast mit Lichtgeschwindigkeit oszillieren, kräuselt das Magnetfeld ihre Bahn und verleiht ihnen enormen Impuls in Richtung des Lichtstrahls – ein für die relativistische Optik charakteristischer Effekt.

Die Wechselwirkung des Lichts mit den Atomkernen kann man normalerweise ignorieren, da die trägen Protonen, deren Masse die der Elektronen um das 2000fache übertrifft, noch viel weniger leicht in Schwingung geraten. Doch bei genügend hoher Intensität vermag das Licht sogar Protonen auf relativistische Geschwindigkeiten zu bringen. Dieser Bereich verdient den Namen nukleare Optik wegen der Vielzahl nuklearer Prozesse – zum Beispiel Kernfusionen –, die dabei auftreten können.

Teilchenbeschleuniger auf dem Labortisch

Die nächstliegende Anwendung für die relativistische Kraft eines ultraintensiven Laserstrahls ist das Beschleunigen geladener Teilchen. Partikelbeschleuniger dienen vielfältigen Zwecken – von der Fernsehröhre über die Krebstherapie bis zur Erforschung der Grundkräfte des Universums. Gemeinsam ist allen, dass elektrische oder magnetische Felder die Teilchen – etwa Elektronen oder Protonen – vorantreiben. Obwohl die elektrischen Feldstärken von Lichtwellen schon im klassischen Bereich so hohe Werte erreichen können wie in der Umgebung eines Gewitterblitzes, taugen sie nicht zur Teilchenbeschleunigung, da sie transversal wirken. Trifft hingegen ein ultraintensiver Lichtpuls auf ein Plasma – ein Gas aus Elektronen und positiven Ionen –, so jagt er die Elektronen wie oben beschrieben fast mit Lichtgeschwindigkeit vorwärts.

Das ist noch nicht alles. Die positiven Ionen des Plasmas bleiben zurück, weil sie tausendfach schwerer sind als die Elektronen. Durch die Trennung positiver und negativer Ladungen baut sich ein starkes elektrisches Feld auf, das nun weitere Partikel zu beschleunigen vermag. Dieses Feld wandert sozusagen im Kielwasser des Lichtpulses als Welle durch das Plasma. Mit solchen Kielfeldern (*wake fields*) werden geladene Teilchen auf hohe Energien beschleunigt – als wären sie Delfine, die in Phase mit der Kielwelle eines Schiffes schwimmen. Einen solchen Laser-Kielfeld-Beschleuniger haben Toshiki Tajima und John M. Dawson an der Universität von Kalifornien in Los Angeles schon 1979 vorgeschlagen.

Weil das elektrische Schwingungsfeld des Lichtpulses in ein Kielfeld umgewandelt wird, das stets in eine Richtung weist, spricht man von optischem Gleichrichten, in Anlehnung an elektronische Gleichrichter, die Wechselstrom in Gleichstrom verwandeln. Bei herkömmlichen Be-

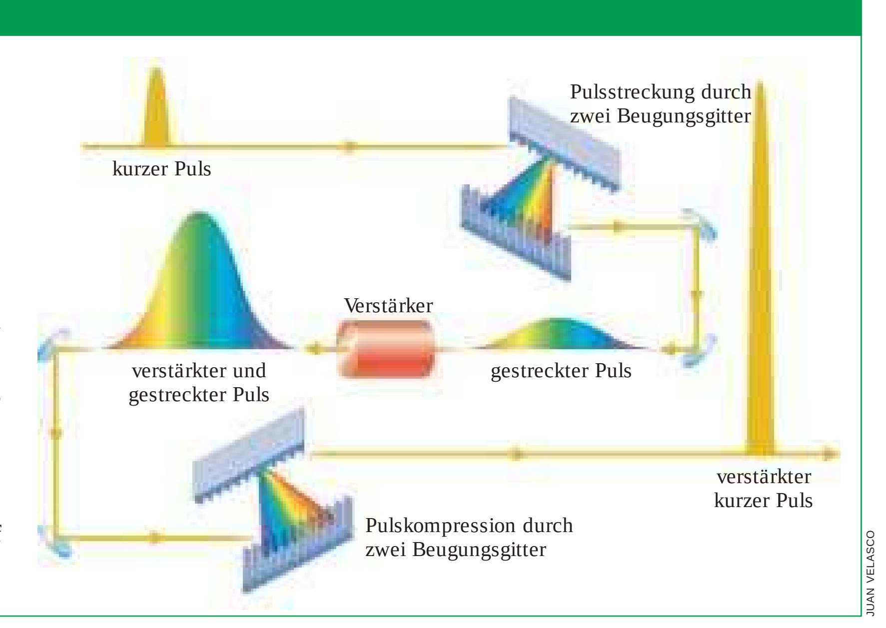
IN KÜRZE

- ➤ Eine Mitte der 1980er Jahre entwickelte Methode zur Laserverstärkung ermöglicht eine neue Generation von kompakten Lasern, die sehr kurze und hochintensive Lichtpulse erzeugen.
- ➤ Diese Laserpulse können Elektronen binnen billiardstel Sekunden fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigen – zehntausendmal effektiver als herkömmliche Teilchenbeschleuniger.
- ➤ Zu den möglichen Anwendungen zählen hochauflösende bildgebende Verfahren in der Medizin, kostengünstige und präzise Strahlentherapie, Kernfusion und andere physikalische Forschungsziele.

Chirped Pulse Amplification

Pulsverstärkung mittels Streckung

Der Schlüssel zu ultraintensiven Tischlasern ist eine Technik namens *Chirped Pulse Amplification* – etwa: Verstärkung gestreckter Laserpulse. Ein kurzer Laserpuls wird zunächst durch zwei Beugungsgitter um den Faktor von etwa 10^4 gedehnt (so genanntes Chirping). Dieser gestreckte Puls ist von geringer Intensität und lässt sich deshalb mit einem kleinen Laserverstärker auf größere Amplitude bringen. Ein zweites Gitterpaar komprimiert den Puls wieder und steigert dadurch dessen Intensität auf das 10^4fache des Spitzenwerts, auf den der Verstärker eigentlich ausgelegt ist.



JUAN VELASCO

schleunigern wie der drei Kilometer langen Röhre am Stanford Linear Accelerator Center (Slac) in Kalifornien wirken Hohlraumresonatoren als Gleichrichter für Wellen im Radiofrequenzbereich, um geladene Teilchen damit wiederholt in Strahlrichtung vorwärts zu stoßen.

Radiowellen sind wie sichtbares Licht elektromagnetische Wellen, allerdings mit größerer Wellenlänge. Der Stanford-Beschleuniger muss drei Kilometer lang sein, damit die Teilchen auf ihrem Weg durch zahlreiche Resonatoren mit jeweils mäßig starkem Beschleunigungsfeld die gewünschte Endenergie erreichen. Die Feldstärke ließe sich im Prinzip mit Radiowellen kürzerer Wellenlänge und größerer Intensität erhöhen, doch beides stößt im Resonator an Grenzen: Die Größe des Hohlraums gibt die Wellenlänge vor, und bei hohen Intensitäten kommt es zum elektrischen Kurzschluss durch Funkenschlag zwischen den metallischen Resonatorwänden. Laser-Kielfeld-Beschleuniger vermeiden diese Beschränkungen, da sie ohne Resonatoren auskommen. Mit Pulsen höchster Intensität würden sich Teilchen vielleicht sogar direkt beschleunigen lassen – genau wie die vom Lichtstrahl erzeugten relativistischen Elektronen –, und das Plasma wäre entbehrlich.

In den letzten Jahren haben lasergetriebene Beschleuniger Elektronen- und Protonenstrahlen von mehr als 50 MeV (Millionen Elektronenvolt) erzeugt. Vergleichbares schafft zwar auch die mehrere Meter lange Einzelstufe eines herkömmlichen Beschleunigers – aber das Lasersystem braucht, um dieselbe Energie zu erreichen, nur einen Millimeter.

Abrupte Beschleunigung über kürzeste Distanz hat Vorteile. Zum Beispiel erzeugte einer von uns (Umstadter) Elektronenstrahlen von einigen MeV, deren „Helligkeit“ – die Anzahl der Teilchen pro Flächeneinheit des Strahlquerschnitts und Sekunde – größer war als in herkömmlichen Beschleunigern. Der Grund ist, dass die in einen ultrakurzen Puls gepressten Ladungspakete weniger Zeit haben, sich durch gegenseitige elektrostatische Abstoßung zu zerstreuen. Wie sich außerdem gezeigt hat, können billige Laser-Beschleuniger viele Aufgaben herkömmlicher Beschleuniger übernehmen, indem sie kurzlebige Radio-Iisotope für die medizinische Diagnostik erzeugen oder Neutronen- und Positronenstrahlen für materialwissenschaftliche Untersuchungen.

Ein Nachteil der Lasersysteme ist allerdings die relativ breite Streuung der Teilchenenergien im Strahl. Außerdem summieren konventionelle Beschleuniger die Wirkung zahlreicher Einzelstufen – so der drei Kilometer lange Linearbeschleuniger des Slac oder der sieben Kilometer im Umfang messende Hauptring des Tevatron am Fermilab (Fermi National Accelerator Laboratory) bei Batavia (Illinois). Darum wird derzeit vor allem versucht, die Energiestreuung des Strahls zu reduzieren und mehrstufige Systeme für höhere Endenergien zu bauen. Andere Forscher experimentieren mit Wellenleitern, um die Strecke zu verlängern, auf der das Kielfeld die Teilchen beschleunigt.

Wir erwarten nicht, dass Laserbeschleuniger einmal herkömmliche Anlagen für die Hoch-energiephysik wie das Tevatron ersetzen werden. Vielmehr ergänzen und erweitern sie heutige Systeme durch spezielle Vorteile für bestimmte Anwendungen und neuartige Experimente. Eine solche Nische könnte die Beschleunigung instabiler Teilchen sein.

Unterwegs zu höchsten Teilchenenergien

Das Tevatron markiert derzeit die Grenze der Hochenergiephysik: Protonen prallen mit einer Energie von einem TeV (eine Billion Elektronenvolt) aufeinander. Auch sein Nachfolger, der Large Hadron Collider beim europäischen Labor für Teilchenphysik Cern, wird mit Protonen arbeiten. Solche Kollisionen ergeben ein kompliziertes und unübersichtliches Bild, weil Protonen aus einem Konglomerat stark wechselwirkender Teilchen bestehen, den Quarks und den Gluonen. ▶

Literaturhinweise

Positronen auf dem Labortisch: Der Laserbeschleuniger erreicht erste Anwendungen. Von Thomas Kühl in: Physikalische Blätter, S. 14, Dezember 2000.

Review of Physics and Applications of Relativistic Plasmas Driven by Ultra-Intense Lasers. Von D. Umstadter in: Physics of Plasmas, Bd. 8, S. 1774, 2001.

Ultrahigh-Intensity Lasers: Physics of the Extreme on a Tabletop. Von G.A. Mourou, C.P.J. Barty und M.D. Perry in: Physics Today, Bd. 51, S. 22, 1998.

Terawatt Lasers Produce Faster Electron Acceleration. Von D. Umstadter in: Laser Focus World, S. 101, 1996.

Weblinks zum Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*

Elektronen und Positronen sind hingegen elementare Teilchen und liefern deshalb saubere Zusammenstöße mit präzisen und detailreichen Messdaten. Nur ist ihre Beschleunigung schwierig: Die leichten Elektronen und Positronen verlieren allzu viel Energie durch so genannte Synchrotronstrahlung, die sie auf ihrem gekrümmten Weg durch den Beschleunigerring abgeben.

Eine Lösung wäre, anstelle von Elektronen Myonen zu nehmen: Sie sind 200mal so schwer und büßen nur ein Milliardstel ihrer Energie durch Synchrotronstrahlung ein. Leider sind Myonen instabil und zerfallen in zwei millionstel Sekunden. Hochintensive Laser könnten sie aber in einem Bruchteil ihrer knappen Lebensdauer fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigen. Dann hilft die relativistische Zeitdilatation weiter: Sie verlängert die Lebensdauer des Myons proportional zur erreichten Energie und gibt nun einem herkömmlichen Beschleuniger mehr Zeit, seine Wirkung zu entfalten. Noch größer wäre der Nutzen prompter Laserbeschleunigung für Pionen, die schon binnen 26 Nanosekunden zerfallen.

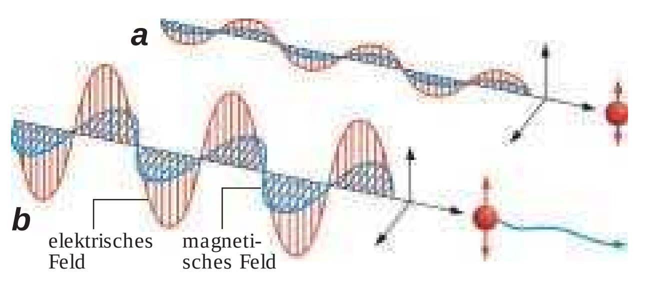
Ein weiteres neuartiges Experiment der Teilchenphysik, das erst durch Ultrahochleistungslaser möglich wird, ist der Gamma-Gamma-Collider. Gammastrahlen haben Frequenzen noch jenseits der Röntgenstrahlung und bestehen aus extrem hochenergetischen Photonen. Kollidiert ein hochintensiver Laserstrahl mit einem hochenergetischen Elektronenstrahl, so entsteht ein scharfer Gammastrahl, weil die Laser-Photonen durch so genannte Compton-Streuung von den Elektronen abprallen. Die Energie der Gammastrahlung hängt von der des Elektronenstrahls ab: Ein Elektronenstrahl mit 250 GeV (Gigaelektronenvolt, Milliarden Elektronenvolt) Energie treibt Photonen von etwa einem eV – der Energie sichtbaren Lichts – auf rund 200 GeV hoch.

Wenn nun zwei solche Gammastrahlen kollidieren, ergeben sich noch klarere Wechselwirkungen als selbst bei Elektron-Positron- oder Myon-Antimyon-Kollisionen. Der Prozess ist die Umkehrung der Paarvernichtung, bei der ein Teilchen und sein Antiteilchen sich in einen Strahlungsblitz purer Energie verwandeln, während hier aus kollidierenden Photonen Teilchen-Antiteilchen-Paare entstehen. Allerdings liefern nur ultraintensive Laser genügend Photonen pro Puls, damit sich ausreichend viele Gamma-Gamma-Kollisionen ereignen. 1997 produzierten Forscher der University of Rochester, der Princeton University, der University of Tennessee und des Slac mit einer Variante dieses Systems Elektron-Positron-Paare, indem Gamma-

Licht als Elektronenschleuder

Relativistische Optik

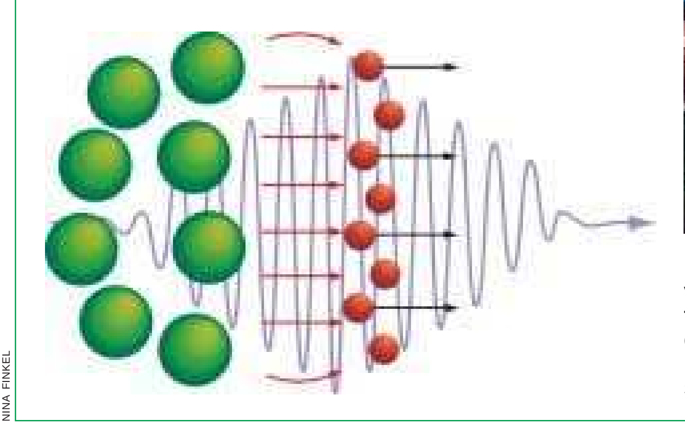
Licht normaler Intensität (*a*) versetzt durch sein elektrisches Feld (rote Welle) Elektronen in eher langsame Schwingungen. Bei extrem hoher Intensität (*b*) oszillieren die Elektronen fast mit Lichtgeschwindigkeit, und das magnetische Feld des Lichtstrahls (blaue Welle) versetzt ihnen einen starken Impuls in Vorwärtsrichtung.



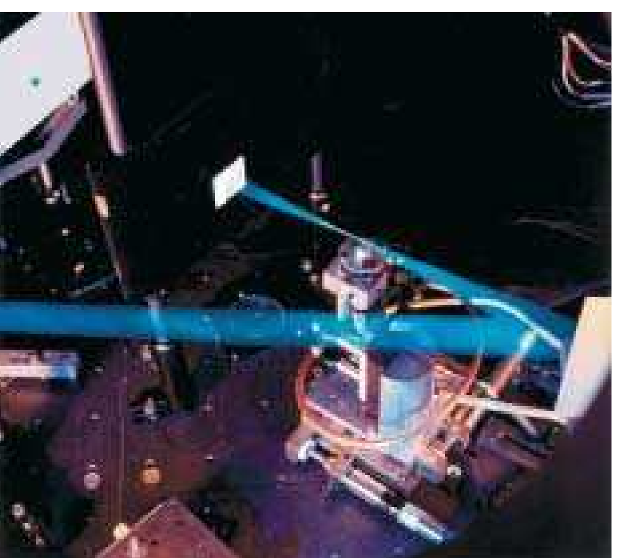
NINA FINKEL

Kielfeld-Beschleunigung

Wenn hochintensives Laserlicht auf ein Plasma trifft, beschleunigt es die darin vorhandenen Elektronen (rot) auf hohe Geschwindigkeit und lässt die schwereren positiven Ionen (grün) zurück. Dadurch entsteht zwischen den getrennten Ladungen ein kräftiges elektrisches Feld (rote Linien). Die Ladungstrennung und das dadurch erzeugte elektrische Feld folgen dem Laserpuls quasi im Kielwasser hinterher und können andere geladene Teilchen auf gewaltige Energien beschleunigen.



NINA FINKEL



WILLIAM PELLETIER, PHOTO SERVICES, INC., UND DONALD UMSTADTER; MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DER UNIVERSITY OF MICHIGAN

Ein ultraintensiver Laserpuls (im Bild durch blaues Licht veranschaulicht) wird über einen Parabolspiegel auf eine Düse fokussiert, aus der Heliumgas strömt. Der Puls beschleunigt die Elektronen im Gas innerhalb eines Millimeters auf 60 MeV. Ein Fluoreszenzschirm (links oben) macht den hochenergetischen Elektronenstrahl sichtbar.

strahlen und Laserphotonen zur Kollision gebracht wurden. Heute sind für jeden Linearbeschleuniger Gamma-Gamma-Experimente geplant, welche die Forschung mit üblichen Elektron-Positron-Kollisionen ergänzen sollen.

Krebsbekämpfung

Weil Laserbeschleuniger besonders durchdringende Röntgen- und Teilchenstrahlen erzeugen, versprechen sie Anwendungen für Krebsdiagnose und -therapie. Bekanntlich dienen Röntgenstrahlen schon seit rund hundert Jahren als diagnostisches Standardwerkzeug. Bei herkömmlichen Röntgenröhren werden Elektronen durch ein elektrisches Feld zwischen Kathode und Anode beschleunigt und beim Auftreffen auf die Anode stark abgebremst, wodurch reichlich Röntgenstrahlung emittiert wird. Die Auflösung der Röntgenbilder ist durch den Durchmesser der Strahlenquelle, in diesem Fall der Anode, begrenzt – meist etwa hundert Mikrometer. Der kleinste damit erfassbare Tumor hat ungefähr einen Millimeter Durchmesser.

Ein hochintensiver Laser erzeugt Röntgenstrahlen, wenn man ihn einfach auf ein passendes Metalltarget fokussiert. Der Strahl beschleunigt die Elektronen nahe der Oberfläche auf hohe Energie; auf ihrem Weg durch das Metallinnere werden die Partikel gebremst und emittieren ausgiebig Röntgenstrahlen. Fokussiert man den Laser auf wenige Mikrometer genau, so entsteht eine winzige Röntgenquelle, die auch kleinste Krebszellhaufen sichtbar zu machen vermag. Dadurch kann die Behandlung schon in einem sehr frühen Entwicklungsstadium des Tumors beginnen. Grundsätzlich wären Auflösungen bis zu einem Mikrometer möglich – kaum mehr als die Wellenlänge des Antriebslasers. Forschungsgruppen an der Stanford University, der Universität Lund in Schweden und dem National Institute of Scientific Research in Quebec haben solche Röntgensysteme bereits konstruiert.

Auch für die Strahlentherapie ist Präzision entscheidend. Besonders bei der Behandlung von Geschwülsten in Gehirn oder Rückenmark kommt es darauf an, exakte Energiemengen in kleine und genau umschriebene Bezirke einzubringen. Dazu eignen sich Strahlen aus Protonen oder Kohlenstoffionen besonders gut. Im Gegensatz zu Elektronen oder Photonen werden schwerere Partikel kaum seitlich gestreut; der Strahl bleibt eng gebündelt. Die Teilchen verlieren unterwegs nur langsam an Energie und geben den größten Teil erst am Ende des Weges ab. Bei einer bestimmten Anfangsenergie ist



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DES LUND CENTER, SCHWEDEN

Diese äußerst detailreiche Röntgenaufnahme einer Ratte wurde mit der Strahlung eines winzigen Plasmatröpfchens gewonnen, das im Brennpunkt eines ultra-intensiven Tischlasers schwebte.

die Weglänge des Strahls durch das Gewebe gut vorhersehbar. Daher erreichen schwerere Ionen einen tief im Körper sitzenden Tumor viel genauer als Elektronen und Photonen.

In mehreren Ländern laufen klinische Studien mit Protonen- und Kohlenstoffstrahlen. Doch die Verbreitung teilchengestützter Therapien wird durch die hohen Kosten herkömmlicher Beschleuniger stark behindert. Zum Beispiel verschlang der Bau des Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (Japan) fast 300 Millionen Dollar. Pro Jahr ermöglicht er die Behandlung von nur 200 Patienten; das ist ein Bruchteil der Fälle, die von dieser Art Krebstherapie profitieren könnten. Zurzeit sind die Ionenenergien von lasergetriebenen Beschleunigern allerdings noch um den Faktor fünf zu schwach und allzu unpräzise definiert. Doch falls es gelingt, diese Probleme zu bewältigen, wird die Ionenstrahl-Krebstherapie viel billiger werden und weit mehr Patienten erreichen.

Ein einziger ultraintensiver Laserpuls liefert so viel Leistung wie alle Kraftwerke der Welt. In Zukunft könnte sich dieses Verhältnis vielleicht sogar umkehren, falls die neuen Laser zum Herzstück von Fusionsreaktoren werden, die einen Teil des Weltenergiebedarfs befriedigen. Seit Jahrzehnten wird die kontrollierte Kernfusion als Mittel zur Energiegewinnung angestrebt – bisher ohne echten Erfolg. Ein neuerdings von manchen favorisierter Ansatz ist die Fusion mittels Trägheitseinschluss; dabei werden Brennstoffkapseln (Gemische aus den schweren Wasserstoffisotopen Tritium und Deuterium) von allen Seiten gleichzeitig mit Dutzenden oder Hunderten intensiver Laserpulse beschossen. Die Laser erhitzen und komprimieren die Kapseln so extrem, dass die Deuterium- und Tritium-Kerne zu Helium verschmelzen und große Energiemengen freisetzen. Der riesige Nova-Laser in Livermore diente vor allem diesem Ziel.

Ultraintensive Tischlaser liefern nicht genügend Gesamtenergie, um die thermonukleare Fusion anzutreiben, aber zusammen mit ihren Verwandten vom Nova-Typ könnten sie die Kernfusion der Realisierung näher bringen. Damit die Fusionsreaktion in Gang kommt, müssen die Kapseln exakt symmetrisch komprimiert werden. Bei der neuen in Livermore geplanten Technik leisten die großen Laser zwar noch die Schwerarbeit beim Komprimieren des Brennstoffs, sie müssen aber nicht mehr die Zündtemperatur erreichen. Sobald die Maximaldichte fast erreicht ist, trifft ein ultrakurzer, durch einen extrem leistungsstarken CPA-Laser beschleunigter Ionenpuls die Kapsel. Er wirkt wie die Zündkerze in einem Automotor: Der Puls erzeugt eine fast punktförmige Erhitzungszone und zündet eine Fusionswelle, die sich über das gesamte Pellet ausbreitet. Diese Technik soll die ungeheuer schwierige Aufgabe, die Fusion allein durch Implosion auszulösen, umgehen und das Verhältnis von gewonnener zu aufgewandter Energie erhöhen.

Einige Voraussetzungen der Schnellzündungstechnik wurden jüngst am Rutherford Appleton Laboratory in Oxfordshire (England) sowie am Institut für Lasertechnik der Universität Osaka (Japan) erprobt. Doch in der Fusionsforschung ist der Weg bis zu einer wirtschaftlichen Energiegewinnung nach wie vor sehr weit. Wir wissen noch nicht, ob gerade diese Anwendung einmal Stoff für Legenden abgeben wird; in jedem Fall aber hat ultraintensives Laserlicht eine Zukunft, die Archimedes oder Diokles sich nie hätten träumen lassen. ■





Gérard A. Mourou *(oben) und* ***Donald Umstadter*** *gehören zu den Gründern des Center for Ultrafast Optical Science an der Universität von Michigan in Ann Arbor. Mourou, der Direktor des Center, ist Professor für Elektrotechnik, Umstadter außerordentlicher Professor für Nuklear- und Elektrotechnik.*

EVOLUTION

Die ältesten Tierspuren?

Die Abdrücke sehen aus, als wären vor kurzem Regenwürmer durch den Sand gekrochen. Doch sie befinden sich in Gestein im Südwesten Australiens, das schon vor 1,2 Milliarden Jahren entstanden ist. Damit sind sie doppelt so alt wie die ältesten bisher bekannten Fossilien vielzelliger Tiere.



BIRGER RASMUSSEN

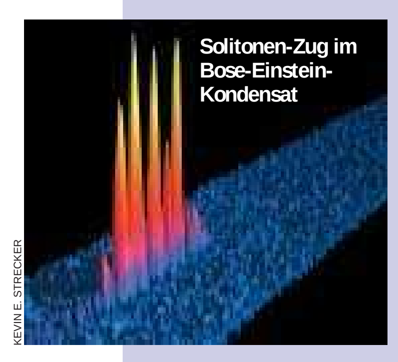
Krochen hier einst Würmer über sandigen Boden?

Nach Ansicht ihrer Entdecker, einem Paläontologenteam um Birger Rasmussen an der Universität von Westaustralien in Crawley, entstanden die merkwürdigen Abdrücke, als wurmartige Tiere beim Kriechen mit ihrem Schleim Sandkörner verklebten. Kritiker glauben allerdings eher, dass Klumpen aus Bakterien, die sich amöbenartig fortbewegten, die Spuren hinterlassen haben. Wenn es nämlich so früh schon relativ hochentwickelte Tiere gab, ist kaum zu verstehen, warum in den folgenden 600 Jahrmillionen keinerlei Reste davon aufgetaucht sind. Die australischen Forscher halten es deshalb für möglich, dass die Verursacher der seltsamen Muster als Laune der Natur entstanden und dann wieder – nicht ganz – spurlos verschwunden sind. *(Science, 10. 5. 2002, S. 1112)*

PHYSIK

Quantensee schlägt hohe Wellen

Der schottische Ingenieur John Scott Russell beobachtete 1834 eine Wasserwoge in einem Kanal, die sich kilometerweit fortbewegte, ohne auseinander zu laufen. Solche nichtlinearen Solitonen wurden inzwischen auf vielen Gebieten entdeckt – von der Teilchenphysik bis zur Optik. Nun konnte ein Team um Kevin E. Strecker an der Rice University in Houston das kuriose Phänomen auch in einem Bose-Einstein-Kondensat erzeugen: einer Ansammlung von Atomen, die bei extrem tiefen Temperaturen zu einem makroskopischen Quantenobjekt verschmelzen. Mit genau abgestimmten Laserstrahlen und Magnetfeldern erreichten die US-Forscher, dass sich aus einem Kondensat aus Lithium-Atomen kleinere Teilchenpakete abschnürten und wie Wogen fortbewegten, ohne sich zu verbreitern. Dabei entstanden Züge aus bis zu 15 Solitonen hintereinander. Sie könnten eines Tages für extrem genaue Gyroskope zur Messung von Drehbewegungen oder Atomuhren verwendet werden. *(Nature, 9. 5. 2002, S. 150)*



KEVIN E. STRECKER

Solitonen-Zug im Bose-Einstein-Kondensat

HIRNFUNKTION

Ferngesteuerte Ratten



SANJIV TALWAR

Willenlos wie ein Automat läuft die ferngelenkte Ratte an einer Schiene entlang.

Für gefährliche Aufgaben wie die Entschärfung von Bomben oder die Suche nach Minen werden oft Roboter eingesetzt. Deren Beweglichkeit ist allerdings begrenzt. Ratten kommen dagegen fast überall hin. Aber wie macht man sie zu willenlosen Werkzeugen? Ein Team um Sanjiv Talwar an der State University von New York hat die Antwort gefunden. Es implantierte den Nagern Elektroden ins Hirn: zwei zur Richtungssteuerung in den Bereich, in dem normalerweise Informationen aus den Barthaaren eintreffen, und eine zur Motivation ins Belohnungszentrum. Auf den Rücken der Tiere schnallten sie einen Minirucksack mit Batterie und Empfänger mit einer Reichweite von bis zu 500 Metern. Bei einem zehntägigen Training im Labyrinth lernten die Ratten, auf die externen Befehle wunschgemäß zu reagieren. Danach waren sie fast in jedem Gelände nach Belieben zu steuern. Sie kletterten sogar ferngelenkt auf Bäume und spazierten über freies, helles Gelände, was sie von sich aus niemals täten. Nur ein letztes Fünkchen Widerstand gegen die lenkende Hand konnten sich die Nager bewahren: Lebensgefährliche Sprünge in die Tiefe verweigerten sie. Tierquälerei? Keineswegs, meint Talwar, denn die Ratten fühlten sich wegen der Stimulation ihres Belohnungssystems stets wohlgemut. Immerhin gesteht er ein, dass die Methode ethische Fragen aufwirft. *(Nature, 2. 5. 2002, S. 37).*

ASTRONOMIE

Gefrorener Ozean unter Marsoberfläche

Der Rote Planet ist staubig und trocken – kein günstiger Ort für Leben. Verschiedene Hinweise (wie canyonartige Strukturen) lassen aber vermuten, dass es dort einmal Wasser gab. Wohin ist es verschwunden? Daten der Sonde Mars Odyssey 2001 scheinen das Rätsel nun gelöst zu haben. Danach erstreckt sich eine riesige Eisschicht, vermengt mit Staub und Felsbrocken, unter der Marsoberfläche zwischen den Polen und Breiten um 60 Grad. Geschmolzen würde sie den Planeten mit einem rund 500 Meter tiefen Ozean bedecken. Das zeigen Daten der Gamma- und Neutronen-Spektrometer an Bord der Marssonde. Alle Atome der obersten Marsschicht werden aus dem All unablässig mit kosmischen Teilchen beschossen und senden daraufhin Gammastrahlen und Neutronen aus. Deren Intensitäts- und Energiespektren geben Aufschluss über die Konzentration und Tiefenverteilung chemischer Elemente. Eine geringe Intensität an „epithermischen" Neutronen zeigt dabei Wasserstoff in Tiefen ab etwa einem halben Meter an. Die Entdeckung von Wasser gibt neuen Marsexpeditionen Auftrieb; denn seine Existenz auf dem Mars erhöht die Wahrscheinlichkeit, Lebensspuren zu finden, und macht bemannte Landungen erst möglich. *(Sciencexpress, 30. 5. 2002, 1073722)*

KLONEN

Einzelnes Gen entscheidet über Erfolg

Die Erfolgsrate beim Klonen von Säugetieren ist sehr gering und erreicht bestenfalls einige Prozent. Das liegt vor allem an der Schwierigkeit, das Genom der hochspezialisierten erwachsenen Spenderzelle in seinen Urzustand zurückzuversetzen. Es muss wieder dasselbe Aktivitätsmuster annehmen wie eine „totipotente“ Embryonalzelle, die noch nicht festgelegt ist und sich zu jedem beliebigen Gewebe entwickeln kann. Inwieweit das gelungen ist, lässt sich nach jüngsten Ergebnissen eines Teams um Hans R. Schöler an der Universität von Pennsylvania an einem einzigen Gen ablesen: *Oct 4*. Sein Proteinprodukt steuert maßgeblich die Embryonalentwicklung und wird bei erwachsenen Tieren deshalb nur noch in den Keimzellen produziert. Wie Schöler und seine Mitarbeiter herausfanden, hing das Wohl und Wehe der geklonten Mäusezellen entscheidend von der Aktivität des *Oct 4*-Gens ab. Nur bei zehn Prozent war sie so hoch, dass sich die Embryonen bis zu einem Stadium weiterentwickelten, in dem sich Stammzellen daraus gewinnen ließen. Obwohl also das misslungene Anschalten von *Oct 4* allein bereits das Schicksal eines Klons besiegelt, vermuten die Forscher, dass auch andere Gene korrekt umprogrammiert werden müssen, damit der Keim sich normal entwickelt. *(Genes and Development, Bd. 16, S. 1209)*

ZOOLOGIE

Drucksensor im Kiefer

In stockfinstrer Nacht lauert der Alligator, halb unter dem Wasserspiegel verborgen, auf Beute. Taucht jetzt ein Tier sein Maul zum Trinken ins Nass, ist sein Schicksal besiegelt. Doch wie kann der Räuber sein Opfer in der Dunkelheit so zielgenau orten? Offenbar benutzen Alligatoren dazu ein bisher unbekanntes Sinnesorgan: Stecknadelgroße Grübchen an ihrer Schnauzenspitze nehmen noch den geringsten Wellenschlag wahr. Ironischerweise dienten diese Drucksensoren seit langem zur Unterscheidung der einzelnen Arten, da sie als blaue Punkte deutlich sichtbar sind. Ihre Funktion war jedoch unbekannt. Nun lüftete Daphne Soares an der Universität von Maryland das Geheimnis. Wenn sie die Grübchen mit einem Plastikband zuklebte, wurden die Alligatoren für Wellen „taub“, während sie sonst selbst auf kleinste Tröpfchen reagierten, die ins Wasser fielen. Die Tiere nutzen die Druckmesser schon seit rund 200 Millionen Jahren. Denn auch fossile Krokodilkiefer haben kleine Löcher im Knochen für die Nerven, die die Erregung der Sensoren ins Gehirn weiterleiten. Das gilt allerdings nur für amphibische Arten und nicht für solche, die ausschließlich an Land leben. *(Nature, 16. 5. 2002, S. 241)*



DAPHNE SOARES

Mit den blauen Pünktchen registriert der Alligator geringste Wasserbewegungen und ortet so seine Beute.

ARCHÄOLOGIE

Farbenprächtiger antiker Sarkophag

Heute erglänzt die Akropolis in strahlendem Weiß – in der Antike leuchtete sie wahrscheinlich in bunten Farben. Ähnliches gilt für all die klassischen Skulpturen, deren edlen Marmorschimmer wir so bewundern. Wie sie im Original aussahen, wissen wir leider nicht; denn der Zahn der Zeit und der Übereifer früherer Archäologen bei der Reinigung ihrer Fundstücke haben kaum je Farbreste übrig gelassen. Eine Ausnahme bildet nun ein behutsam restaurierter Sarkophag aus dem vierten vorchristlichen Jahrhundert. Von Grabräubern auf der Flucht zurückgelassen, gelangte der zerbrochene und völlig verdreckte Marmorbehälter von der kleinasiatischen Nekropole Can nach seiner Entdeckung durch die Polizei ins Canakkale Museum in der Nordwesttürkei. Restauratoren entfernten dort vorsichtig mit Skalpellen, Stöckchen und Gebläsen die Schmutzkruste – das einfache Abspülen mit Wasser und Putzmittel hätte die Farbpigmente mit abgelöst. Zu Tage kamen farbenfrohe Jagd- und Kampfszenen. Die vorsichtige Reinigungsmethode machte den Totenbehälter zum farbenprächtigsten Sarkophag der klassischen griechischen Antike. *(University of Cincinnati/Studia Troica Mai 2002)*



STUDIA TROICA MAI 2002

In Originalfarben: Kampfszene auf antikem Sarkophag aus Can in der Türkei

Hirnschäden durch Kindesmisshandlung

Wunden, die nicht verheilen

Schwere Misshandlungen im frühen Kindesalter können die Entwicklung des kindlichen Gehirns so stark beeinträchtigen, dass dauerhafte Schäden zurückbleiben. Die Störungen der Hirnfunktion lassen sich noch im Erwachsenenalter nachweisen.

Von Martin H. Teicher

Die Polizisten waren entsetzt: In einer völlig verwahrlosten Wohnung entdeckten sie einen unterernährten Vierjährigen, dessen kleine Hände fürchterliche Verbrennungen trugen. Wie sich herausstellte, hatte die drogensüchtige Mutter die Hände ihres Kindes unter einen dampfend heißen Wasserhahn gehalten – zur Strafe, weil der Kleine trotz Verbots die Mahlzeit ihres Freundes aufgegessen hatte. Die schmerzhaften Wunden waren überhaupt nicht versorgt worden.

Diese beunruhigende Geschichte, die sich 1994 in Boston ereignete, machte seinerzeit in den USA Schlagzeilen. Später kam der Junge zu Pflegeeltern und erhielt Hauttransplantate, damit er seine vernarbten Hände allmählich wieder gebrauchen konnte. Doch obwohl die physischen Wunden des Opfers behandelt wurden, lassen neuere Forschungsergebnisse vermuten, dass die seelischen Verletzungen, die dem Jungen in einer frühen Entwicklungsphase zugefügt wurden, vielleicht niemals wirklich heilen werden.

Leider ist dieser extreme Fall nur ein Beispiel für viele. Jedes Jahr erhalten die Jugendämter in den USA mehr als drei Millionen Meldungen über angebliche Kindesmisshandlung und Vernachlässigung – und sammeln in mehr als einer Million Fällen Beweismaterial dafür, dass die Anschuldigung zutrifft. (Für Deutschland werden laut Kriminalstatistik im Jahresmittel rund 2100 Kindesmisshandlungen und 16000 Fälle von Kindesmissbrauch aktenkundig. Die tatsächliche Gesamtzahl der Misshandlungsfälle – inklusive der umstrittenen, jedenfalls erheblichen Dunkelziffer – wird auf jährlich 300000 geschätzt.)

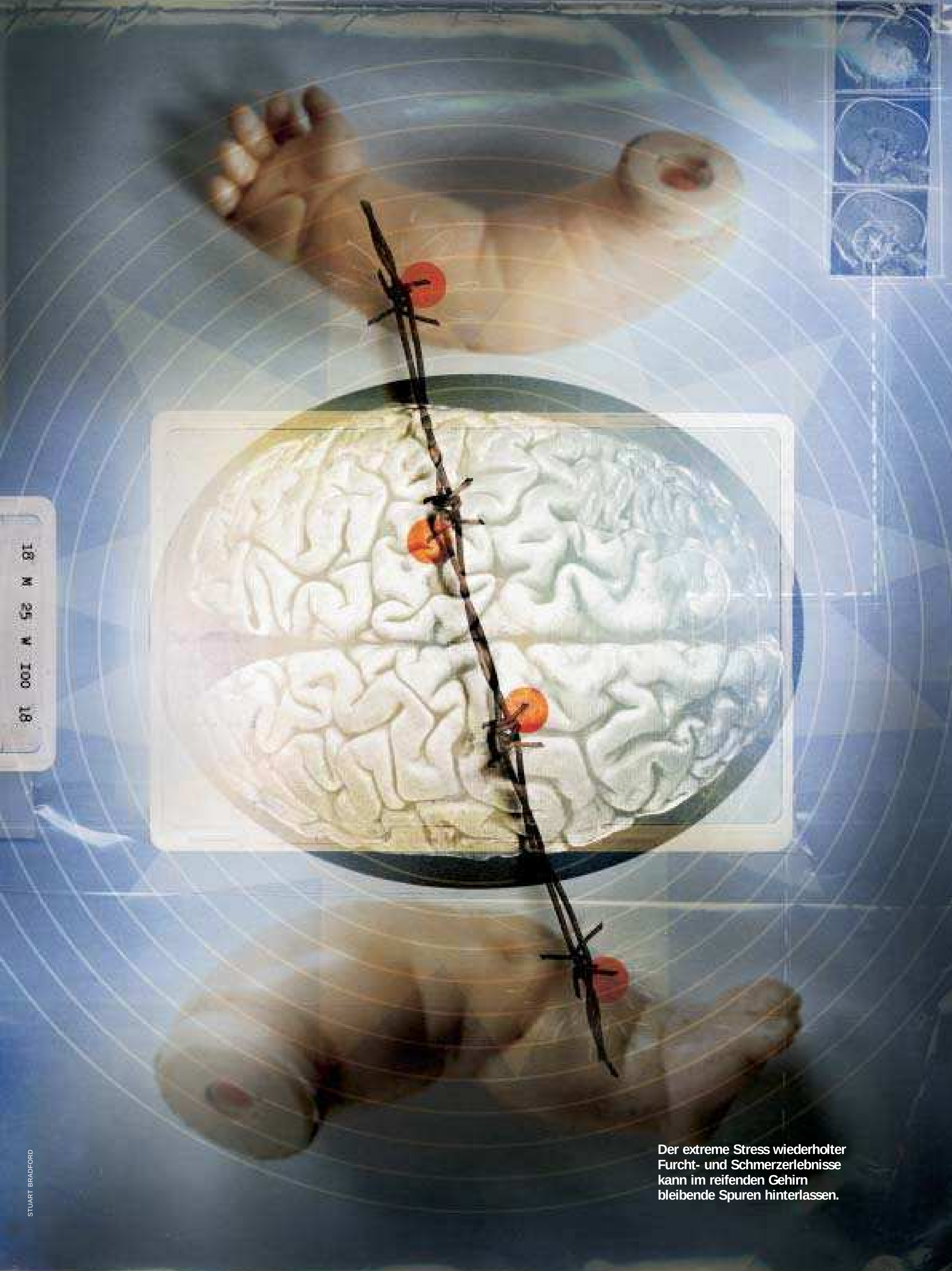
Es überrascht uns kaum, dass wissenschaftliche Untersuchungen einen deutlichen Zusammenhang zwischen physischer, sexueller und emotionaler Misshandlung von Kindern und dem Entstehen psychiatrischer Probleme zeigen. Doch bis in die frühen 1990er Jahre vermuteten die Fachleute, emotionale und soziale Schwierigkeiten entstünden hauptsächlich aus psychologischen Gründen. Sie nahmen an, Kindesmisshandlung fördere entweder die Entwicklung innerseelischer Abwehrmechanismen, die sich im Erwachsenenalter als selbstzerstörerisch erweisen, oder er hemme die psychosoziale Entwicklung so sehr, dass im Innern ein „verwundetes Kind" zurückbleibe. Forscher hielten die Schädigung im Grund für ein Software-Problem, das sich durch Umprogrammieren mittels Therapie lösen lässt, oder das durch die Aufforderung „Lass dich nicht unterkriegen" einfach zum Verschwinden gebracht werden kann.

Neuere Untersuchungen, die unter anderem von meinen Kollegen und mir am McLean Hospital in Belmont (Massachusetts) und an der Harvard Medical School durchgeführt wurden, vermitteln ein anderes Bild. Weil Kindesmisshandlung in einer für die Hirnentwicklung entscheidenden Phase stattfindet, in welcher das Gehirn durch neue Erfahrungen und Erlebnisse physisch geprägt wird, können schwere Belastungen unauslöschliche Spuren in seiner Struktur und Funktion hinterlassen. Anscheinend löst die Misshandlung eine Flut molekularer und neurobiologischer Wirkungen aus, die die neurale Entwicklung unwiderruflich verändern.

Gestörte Persönlichkeit

Die Folgen der Kindesmisshandlung können in jedem beliebigen Alter auf unterschiedlichste Weise zu Tage treten. Innerlich können sie als Depression, Angst, Selbstmordgedanken oder posttraumatische Belastungsstörungen erscheinen; ebenso können sie nach außen als Angriffslust, Erregbarkeit, Straffälligkeit, Überaktivität oder Drogenmissbrauch zum Ausdruck kommen. Ein mit früher Misshandlung eng verbundenes psychiatrisches Erscheinungsbild ist die Borderline-Persönlichkeitsstörung.

Jemand mit dieser Störung sieht seine Mitmenschen entweder schwarz oder



Der extreme Stress wiederholter Furcht- und Schmerzerlebnisse kann im reifenden Gehirn bleibende Spuren hinterlassen.

STUART BRADFORD

weiß. Oft stellt er eine Person zuerst auf ein Podest und lässt dann, plötzlich von ihr enttäuscht, kein gutes Haar an ihr. Die Betroffenen neigen auch zu Wutausbrüchen und flüchtigen Episoden von Paranoia oder Psychose. Meist haben sie intensive unstabile Beziehungen durchlebt, fühlen sich leer oder ihrer Identität nicht sicher; sie versuchen oft mittels Drogen vor sich selbst zu fliehen und verspüren den Impuls, sich zu schaden oder gar das Leben zu nehmen.

Als ich 1984 drei Patienten mit Borderline-Persönlichkeitsstörung behandelte, begann ich zu vermuten, dass die verschiedenen Formen von Misshandlung, denen sie schon früh ausgesetzt waren, die Entwicklung ihres limbischen Systems verändert hatten. Das limbische System ist eine Ansammlung miteinander verbundener Hirnkerne oder neuronaler Zentren, die eine entscheidende Rolle bei der Regelung von Emotion und Gedächtnis spielen. Zwei besonders wichtige limbische Regionen sind der Hippocampus und die Amygdala (der Mandelkern), die unterhalb der Hirnrinde im Schläfenlappen liegen (Kasten Seite 81). Der Hippocampus ist wichtig für die Bildung und Wiedergewinnung sowohl verbaler als auch emotionaler Gedächtnisinhalte, während die Amygdala die Aufgabe hat, den emotionalen Gehalt einer Erinnerung zu erzeugen – beispielsweise Gefühle, die mit Furcht und aggressiven Reaktionen zusammenhängen.

IN KÜRZE

➤ Bis vor kurzem glaubten die Psychologen, Kindesmisshandlung führe zu verzögerter psychosozialer Entwicklung und zu schädlichen psychischen Abwehrmechanismen im Erwachsenenalter. Bildgebende Verfahren und Experimente zeigen jedoch, dass Kindesmissbrauch die neurale Struktur und Funktion des reifenden Gehirns dauerhaft schädigen kann.

➤ Dieses Resultat besagt, dass viel mehr unternommen werden muss, um den Missbrauch und die Vernachlässigung von Kindern zu verhindern, bevor Millionen junger Opfer irreparablen Schaden nehmen. Auch sind wohl neue Therapieansätze angebracht.

Erröten, Brechreiz, Schwindel und Zucken

Meine Kollegen Yutaka Ito, Carol A. Glod und ich fragten uns, ob der Kindesmissbrauch die gesunde Entwicklung dieser Hirnregionen zu unterbrechen vermag. Könnte dadurch die Amygdala in einen Zustand erhöhter elektrischer Erregbarkeit geraten? Könnte der noch unreife Hippocampus durch eine Überschwemmung mit Stresshormonen beschädigt werden? Die Schädigung des Hippocampus oder die Übererregung der Amygdala könnte Symptome erzeugen, die einer Schläfenlappenepilepsie (Temporallappenepilepsie, TLE) gleichen, bei der die Funktion dieser Hirnkerne sporadisch unterbrochen wird. Während eines TLE-Anfalls bleiben die Patienten bei Bewusstsein und erleben eine Reihe psychomotorischer Symptome, die durch elektrische Gewitter innerhalb dieser Regionen entstehen. Zu den Begleiteffekten gehört der plötzliche Beginn von Kitzeln, Benommenheit oder Schwindel; motorische Erscheinungen wie unkontrollierbares Starren oder Zucken; vegetative Symptome wie Erröten, Brechreiz oder ein Gefühl in der Magengrube wie in einem schnell anfahrenden Aufzug. TLE kann auch Halluzinationen oder Illusionen in allen fünf Sinnen verursachen. Es ist etwa nicht ungewöhnlich, dass der Betroffene wie Alice im Wunderland die Größe und Form von Gegenständen verzerrt wahrnimmt; häufig treten auch Erlebnisse von Déjà-vu und einer Trennung von Körper und Geist auf.

Um den Zusammenhang zwischen frühem Missbrauch und Funktionsstörung des limbischen Systems zu erforschen, entwarf ich einen Fragebogen, der die Häufigkeit erfasst, mit der Patienten TLE-verwandte Symptome erfahren. 1993 legten wir die Daten von 253 erwachsenen Besuchern einer ambulanten psychiatrischen Klinik vor. Etwas mehr als die Hälfte berichtete, dass sie als Kinder körperlich misshandelt oder sexuell missbraucht – oder beides – worden waren. Verglichen mit Patienten, die nichts dergleichen meldeten, lag bei früh misshandelten (aber nicht sexuell missbrauchten) Patienten die mittlere Häufigkeit TLE-ähnlicher Symptome um 38 Prozent höher, bei Patienten mit Missbrauchserfahrung (aber ohne andere körperliche Misshandlung) um 49 Prozent. Patienten, die sowohl Misshandlungen als auch sexuellen Missbrauch angaben, hatten Werte, die im Mittel um 113 Prozent höher lagen als bei den Patienten, die nichts von beidem berichteten. Misshandlungen vor dem 18. Lebensjahr hatte größeren Einfluss als spätere, und Männer wie Frauen waren gleichermaßen betroffen.

1994 versuchten wir festzustellen, ob körperliche, sexuelle oder psychische Kindesmisshandlungen mit Abweichungen im Elektroenzephalogramm (EEG) einhergehen, das ein direkteres Maß für die elektrische Erregbarkeit des limbischen Systems liefert als unser Fragebogen. Wir überprüften die Daten von 115 Patienten, die früher in einer Klinik für Kinder- und Jugendpsychiatrie aufgenommen worden waren, und fanden tatsächlich einen Zusammenhang: klinisch auffällige EEGs bei 54 Prozent der Patienten mit einem frühen Trauma, aber nur bei 27 Prozent der nicht früh misshandelten Patienten. Von denjenigen mit einer Vorgeschichte schwerer körperlicher und sexueller Misshandlungen zeigten sogar 72 Prozent EEG-Anomalien. Diese Unregelmäßigkeiten entstanden in frontalen und temporalen Hirnregionen und betrafen zu unserer Überraschung eher die linke Hemisphäre, nicht aber beide Hirnhälften, wie man eigentlich erwarten würde.

Unsere Befunde passten gut zu einer 1978 durchgeführten EEG-Studie an Erwachsenen, die Opfer eines Inzests geworden waren. Robert W. Davies von der Yale University School of Medicine hatte damals festgestellt, dass 77 Prozent der Untersuchten EEG-Abweichungen zeigten und 27 Prozent Anfälle erlitten.

Später hatten Untersuchungen mittels Kernspintomografie einen Zusammenhang zwischen früher Misshandlung und einer Verkleinerung des erwachsenen Hippocampus nachgewiesen; auch die Amygdala war manchmal kleiner als normal. 1997 verglich J. Douglas Bremner an der Yale University School of Medicine kernspintomografische Aufnahmen von 17 Erwachsenen, die als Kinder missbraucht worden waren und alle an einer so genannte posttraumatischen Belastungsstörung (PTBS) litten, mit einer Kontrollgruppe von 17 Gesunden, die hinsichtlich Alter, Geschlecht, Rasse, Händigkeit, Ausbildungsjahren und Jahren des Alkoholmissbrauchs zu den Missbrauchsopfern passten. Der linke Hippocampus der missbrauchten Patienten mit PTBS war im Mittel 12 Prozent kleiner als bei den gesunden Kontrollpersonen, aber der rechte Hippocampus hatte normale Größe. Angesichts der Bedeutung des Hippocampus für das Gedächtnis überrascht es nicht, dass diese Patienten auch bei verbalen Gedächtnistests schlechter abschnitten als die nicht Missbrauchten.

Schwund im Hippocampus

1997 fand Murray B. Stein von der Universität von Kalifornien in San Diego ebenfalls Abweichungen des linken Hippocampus bei 21 erwachsenen Frauen, die als Kinder sexuell missbraucht worden waren und nun an PTBS oder an dissoziativer Identitätsstörung litten; Letztere, auch multiple Persönlichkeitsstörung genannt, tritt nach Ansicht man-

cher Forscher bei missbrauchten Frauen häufig auf. Stein stellte fest, dass bei diesen Frauen der linke Hippocampus deutlich verkleinert, der rechte aber relativ unbeeinträchtigt war. Zusätzlich fand er eine klare Entsprechung zwischen dem Grad der Verkleinerung und der Stärke der dissoziativen Symptome. 2001 berichteten Martin Driessen und seine Kollegen vom Gilead-Krankenhaus in Bielefeld, dass bei erwachsenen Frauen mit Borderline-Persönlichkeitsstörung und Missbrauchsvorgeschichte der Hippocampus um 16 Prozent und die Amygdala um 8 Prozent kleiner sind als normal.

Andererseits konnte Michael D. De Bellis an der Universität Pittsburgh 1990 beim sorgfältigen Ausmessen kernspintomografischer Bilder des Hippocampus von 44 misshandelten Kinder mit PTBS keinen signifikanten Volumenunterschied gegenüber 61 gesunden Kontrollpersonen feststellen.

Ähnliche Ergebnisse erhielten Susan Andersen, Ann Polcari und ich in unserer kürzlich vervollständigten volumetrischen Analyse des Hippocampus bei 18 jungen Erwachsenen – 18 bis 22 Jahre – mit einer Vorgeschichte wiederholter, von Furcht oder Schrecken begleiteter Vergewaltigungen. Die Kontrollgruppe bestand aus 19 Personen gleichen Alters, die im Gegensatz zu früheren Studien nicht Patienten waren, sondern aus der allgemeinen Bevölkerung stammten und daher weniger psychische Probleme hatten. Wir beobachteten keine Unterschiede im Volumen des Hippocampus. Ebenso wie Driessens Gruppe fanden wir jedoch eine Verkleinerung der linken Amygdala um durchschnittlich 9,8 Prozent, die mit Gefühlen von Depression, Übererregbarkeit oder Feindseligkeit korreliert war.

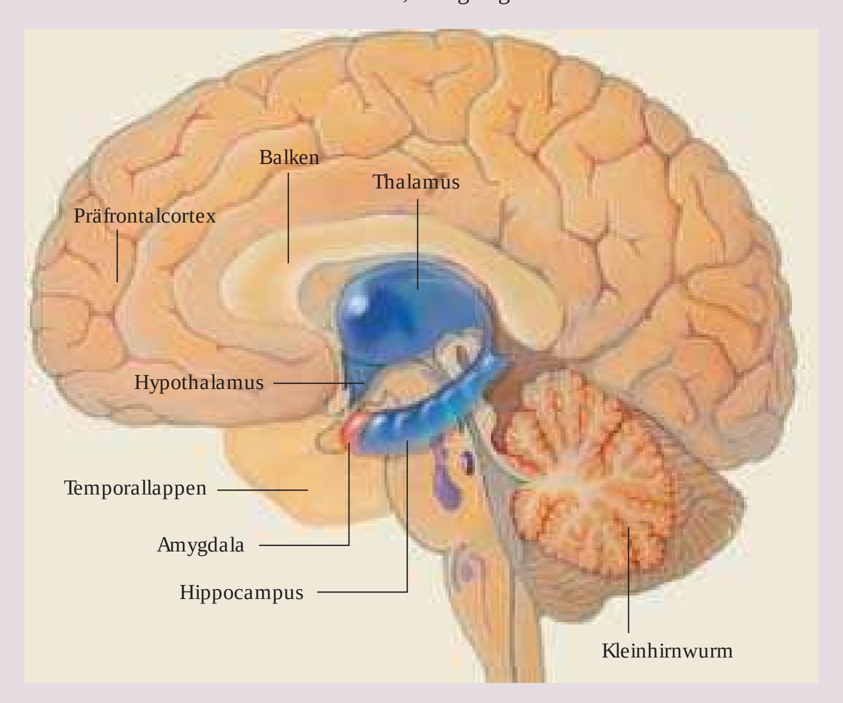
Wir fragten uns natürlich, warum der Hippocampus von missbrauchten Personen in den Untersuchungen von Bremner, Stein und Driessen verkleinert war, während sowohl De Bellis Gruppe als auch wir keinen Effekt fanden. Die wahrscheinlichste Antwort lautet, dass Stress sich nur ganz allmählich auf den Hippocampus auswirkt und ein anatomisch nachweisbarer Effekt darum erst ab einem gewissen Alter erkennbar wird.

Zudem hatten Tierversuche von Bruce S. McEwen von der Rockefeller University und Robert M. Sapolsky von der Stanford University schon früher gezeigt, wie stark der Hippocampus durch Stress geschädigt werden kann. Er ist nicht nur besonders anfällig, weil er sich langsam entwickelt, sondern auch, weil er zu den wenigen Hirnregionen zählt, in denen auch nach der Geburt Neuronen entstehen. Überdies hat der Hippo- ▶

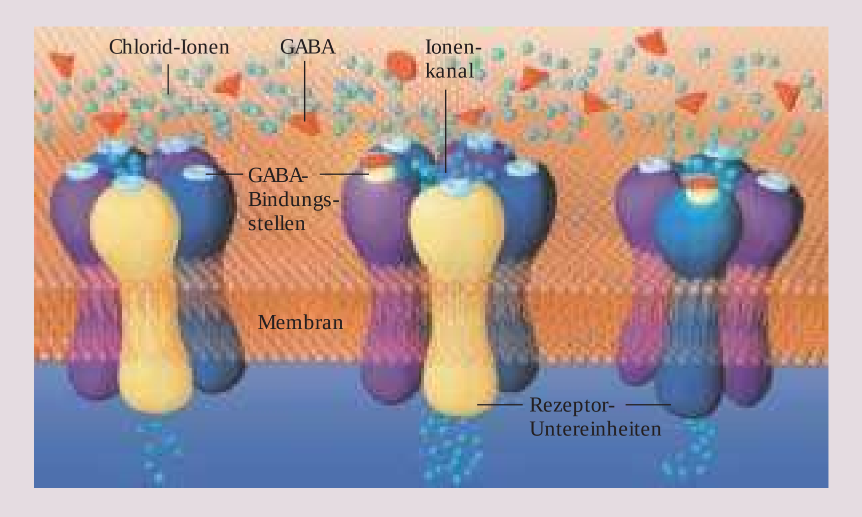
Schädigung der GABA-Rezeptoren im limbischen System

Wie Missbrauch das Gehirn verändert

Verhaltensstörungen infolge von Kindesmissbrauch werden anscheinend durch die Übererregbarkeit des limbischen Systems verursacht; diese urtümliche Region des Mittelhirns steuert Gedächtnis und Gefühle. Zwei eher kleine, tief liegende Hirnstrukturen – Hippocampus und Amygdala – spielen dabei eine wichtige Rolle. Der Hippocampus bestimmt, welche Informationen im Langzeitgedächtnis gespeichert werden. Die Amygdala filtert und interpretiert die ankommenden Sinnesdaten bezüglich ihrer Bedeutung für das Überleben und die emotionalen Bedürfnisse, um geeignete Reaktionen auszulösen.



Stress verändert die postsynaptischen Rezeptoren (unteres Bild) für die Gamma-Amino-Buttersäure (GABA), den wichtigsten inhibitorischen Neurotransmitter im menschlichen Zentralnervensystem. Die stressbedingten Veränderungen können zu erhöhter Erregbarkeit einzelner Neuronen und schließlich zu Überreizung des gesamten limbischen Systems führen. GABA mindert die Erregbarkeit der Neuronen, indem der Durchfluss von Chlorid-Ionen erleichtert wird (Mitte). Büßt der GABA-Rezeptor eine seiner Untereinheiten ein, vermag er die neuronale Aktivität schlechter zu steuern (rechts).



GRAFIKEN: CAROL DONNER

KOMMENTAR

Sind die Schäden wirklich irreparabel?

Von Walter Massing

Ohne Frage haben Vernachlässigung, Misshandlung und sexueller Missbrauch im Kindesalter verheerende und lebenslange Auswirkungen auf die emotionale und körperliche Entwicklung der Opfer. Doch im Einzelfall bleibt häufig offen, ob frühkindlicher Missbrauch stattgefunden hat oder nicht. Amerikanische und britische Psychologenverbände warnen davor, frühkindlichen sexuellen Missbrauch, der zum ersten Mal in einer Therapie herausgearbeitet wird, als gesichert zu betrachten (siehe „Falsche Erinnerungen“ von Elizabeth F. Loftus, SdW 1/1998, S. 62).

Teichers Artikel vermittelt den Eindruck, endlich sei der Nachweis möglich, dass bei einer bestimmten Person sexueller Missbrauch und Misshandlung stattgefunden haben. Ähnlich zuverlässig wie bei einem DNA-Test sei eine bestimmte Kombination von neurophysiologischen und neuroradiologischen Befunden in eindeutiger Weise mit materiell fassbaren Relikten des Traumas verknüpft.

Die Schwierigkeiten beginnen allerdings schon bei der Bestimmung der Begriffe. So klingen bei „Trauma“ immer mehrere Bedeutungen mit, die zwischen der Wunde und dem Ereignis, das sie hervorrief, hin- und herschwanken und auch keinen deutlichen Unterschied zwischen einmaliger Verletzung und deren lebenslangem Fortwirken machen. Wenn also Veränderungen im Gehirn feststellbar sind – beziehen sie sich auf ein einmaliges Ereignis oder auf dessen Folgeerscheinungen über Jahre hinweg? Wie sind die Befunde von Balkenverkleinerung, Hippocampus- und Amygdala-Atrophie einzuordnen, wenn sie Jahrzehnte nach dem Trauma festgestellt werden? Dass einmalige Veränderungen so lange überdauern könnten, ist bei der bekannten Plastizität des Gehirns kaum vorstellbar.

Weiterhin ist zu fragen: Sind die am Gehirn von Patienten beobachteten Veränderungen ein Beweis dafür, dass Misshandlung und Missbrauch stattgefunden haben? Schlüssig wäre ein solcher Beweis, wenn sich psychiatrischer Fall, psychiatrische Klassifikation sowie spezifisches Muster neuroradiologischer und elektrophysiologischer Hirnveränderungen eins zu eins aufeinander abbildeten. Doch das trifft nicht zu. In der Psychiatrie ist über die Ursachen der einschlägigen Erkrankungen nichts Genaues bekannt. Die Krankheitsklassifikation basiert ausschließlich auf klinischen Beschreibungen. Bereits 1913 sah der Philosoph und Psychologe Karl Jaspers in seiner „Allgemeinen Psychopathologie“ die ideale Forderung, dass es für jeden Fall nur eine diagnostische Kategorie geben dürfe, als nicht erfüllt an: Anstelle von Krankheitseinheiten träten vielerlei Variationen seelischer Störungen auf, die „überall und nach allen Richtungen fließend ineinander übergehen“.

Das Problem potenziert sich, wenn die ohnehin sehr ähnlichen Krankheitsgruppen gleiche neuroradiologische Befunde zeigen. So lassen sich die laut Teicher für Kindesmisshandlung und sexuellen Kindesmissbrauch typischen Befunde – Atrophie des linken Hippocampus und der linken Amygdala, verzögerte Reife der linken Hemisphäre und Verkleinerung des Balkens – auch bei Schizophrenie, Depression und Borderline-Persönlichkeitsstörung nachweisen. Die Verwirrung ist vollständig, wenn Patienten all dieser Krankheitsgruppen von einer Vorgeschichte mit Kindesmissbrauch und Gewalt berichten. Inzwischen setzen einige Psychotherapeuten den frühkindlichen Kindesmissbrauch geradezu als universelle Krankheitsursache voraus, und der amerikanische Psychiater Colin A. Ross macht frühkindliche Traumata, insbesondere den Kindesmissbrauch, für die Entstehung aller psychiatrischen Erkrankungen verantwortlich.

Im Jahre 1896 bemerkte Sigmund Freud zu eigenen psychoanalytischen Arbeiten, „dass die vermuteten traumatischen Erlebnisse in der frühesten Kindheit des Kranken vorfallen und als sexueller Missbrauch im engeren Sinne zu bezeichnen sind“. Offensichtlich war Freud eine Überprüfung des Wahrheitsgehalts dieser Missbrauchserlebnisse später unwichtig, weil das Störungsbild Hysterie ungeachtet dessen, ob

campus unter allen Hirnregionen die höchste Rezeptorendichte für das Stresshormon Cortisol. Stresshormone können die Gestalt der größten Neuronen im Hippocampus deutlich verändern und sie sogar abtöten. Stress unterdrückt auch die Bildung neuer Körnerzellen – kleiner Neuronen –, die sich normalerweise nach der Geburt weiterentwickeln.

Experimente an Ratten durch Christian Caldji und Michael J. Meaney von der McGill University sowie Paul M. Plotsky von der Emory University haben ergeben, dass früher Stress die molekulare Organisation dieser Hirnregionen verändert – insbesondere die Struktur der GABA-Rezeptoren in der Amygdala (siehe Bild Seite 81). Diese Rezeptoren reagieren auf Gamma-Amino-Buttersäure (gamma aminobutyric acid, GABA), den wichtigsten inhibitorischen Neurotransmitter, der die elektrische Erregbarkeit der Neuronen mindert. Wird die Funktion dieses Neurotransmitters gestört, so entsteht übermäßige elektrische Aktivität – bis hin zu Krampfanfällen. Diese Entdeckung liefert eine elegante molekulare Erklärung für unser Ergebnis, dass Patienten mit frühkindlicher Misshandlung oft ein abnormes EEG und Übererregbarkeit des limbischen Systems zeigen.

Die problematische linke Seite

Die Wirkung des Kindheitstraumas auf das limbische System hatten wir erwartet, nicht aber, dass die EEG-Abweichungen bevorzugt in der linken Hemisphäre auftraten. Darum begannen wir die Wirkung frühen Missbrauchs auf die Entwicklung der linken und der rechten Hemisphäre mittels EEG-Kohärenz zu untersuchen. Diese ausgeklügelte Methode gibt detaillierten Aufschluss über die Mikrostruktur des Gehirns – quasi seine Verdrahtung und Verschaltung. Hingegen zeigt das gewöhnliche EEG die Hirntätigkeit eher im Großen und Ganzen. Die EEG-Kohärenztechnik erzeugt ein mathematisches Maß für die Korrelation zwischen den komplizierten neuronalen Verbindungen der Hirnrinde, welche die elektrischen Signale im Gehirn verarbeiten und modifizieren. Im Allgemeinen sind abnorm hohe EEG-Kohärenzwerte ein Indiz für eine zurückgebliebene Entwicklung dieses neuronalen Austauschs.

Unsere Forschungsgruppe setzte diese Technik 1997 ein, um 15 gesunde Freiwillige mit 15 Patienten aus der Kinder- und Jugendpsychiatrie zu vergleichen, die nachweislich intensiv misshandelt oder sexuell missbraucht worden waren. Den Kohärenzwerten zufolge war die linke Hirnrinde der gesunden Kontrollpersonen besser entwickelt als die rechte. Das war auf Grund der Anatomie der dominanten Hemisphäre zu erwarten: Bei Rechtshändern dominiert die linke Hirnrinde. Doch die misshandelten Patienten waren in der rechten Hemisphäre deutlich weiterentwickelt als in der linken – obwohl sie alle Rechtshänder und somit links-dominant waren. Die rechte Hemisphäre der missbrauchten



DEUTSCHE BUNDESPOST

1954 ahnten die wenigsten Bürger, die diese Briefmarke zu Ehren der herausragenden Sozialarbeiterin und Feministin Bertha Pappenheim aufklebten, dass sie die berühmte Patientin Anna O. der Ärzte Breuer und Freud war.

sexueller Missbrauch in der Kindheit stattgefunden hatte oder nicht, durch so offensichtliche Phänomene wie Verdrängung und Konversion („Umsetzung psychischer Erregung in körperliche Dauersymptome") gekennzeichnet war.

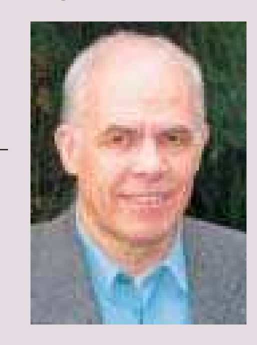
Zu dieser Einsicht war Freud in der Zusammenarbeit mit dem Arzt Joseph Breuer gekommen, der wiederum sehr intensiv die Patientin Anna O. untersucht hatte. Die 21-Jährige war durch die Pflege ihres siechen Vaters überfordert und selbst schwer erkrankt. Was hätten Breuer und Freud im Gehirn von Anna O. gefunden, wenn sie damals über die heutigen bildgebenden Verfahren verfügt hätten?

Angesichts der Befunde Teichers ist die Frage deshalb so reizvoll, weil Anna O., wie Breuer formulierte, eine überwiegend linkshirnige Symptomatik ausgebildet hatte. Trotz dieser neurologischen Erscheinungen waren Breuer und Freud überzeugt, dass sich das Gehirn der Anna O. in keiner Weise von dem ihrer normalen Altersgenossinnen unterscheide. Diese Sicherheit rührte daher, dass es Joseph Breuer gelungen war, die neurologischen Symptome der Anna O. aufzulösen, indem er das traumatisierende Ereignis in das Bewusstsein der Patientin zurückrief.

Sigmund Freud wiederum lernte an diesem Fall, dass „die hysterischen Symptome Überreste affektiv betonter Erlebnisse" und als solche dem „Bewusstsein des Individuums nicht zugänglich sind". Freud sah den therapeutischen Erfolg in der Aufhebung der Verdrängung – das heißt, „ein Teil des unbewussten Materials" wurde wieder dem Bewusstsein zugeführt. Im Gegensatz zu der eher statischen Auffassung, die Teicher vertritt, stellte Freud fest: „Unsere Auffassung ist dynamisch, sie versteht die psychischen Vorgänge als Folge der Verschiebungen von psychischer Energie."

In Teichers Terminologie ist die posttraumatische Belastungsstörung ein „Hardware-Problem". Entsprechend pessimistisch beurteilt Teicher die Folgen frühkindlicher Traumatisierung. Für ihn ist die neuronale Entwicklung nach einem solchen Ereignis unwiderruflich verändert. Im Besonderen meint er, Psychotherapie sei unwirksam und verharmlose die posttraumatische Störung als Software-Problem.

Letztlich stellt sich die Frage, ob Teichers biologische Theorie ausreicht, die psychoanalytische Theorie zu ersetzen. Wäre es nicht lohnenswert, Versuchsanordnungen auszudenken, die es erlauben, psychoanalytisches Gedankengut unter Standardbedingungen zu reproduzieren? Dies ist inzwischen geschehen. Die Psychologen Michael C. Anderson und Collin Green von der Universität Oregon erzeugten experimentell die Verdrängung bestimmter Erinnerungen bei 32 Studenten (*Nature, Bd. 410, S. 366, 2001*). Sie forderten die Testpersonen auf, eine mit einem vertrauten Gegenstand verknüpfte Erinnerung jedes Mal aktiv zu vermeiden, wenn der vertraute Gegenstand gezeigt wurde. Nach mehreren Durchläufen wurde diese Erinnerung verdrängt und später nur sehr schlecht wiedererinnert. Diese Studie ist ein viel versprechender Anfang, hemmende Einflüsse auf das Gedächtnis zu untersuchen, die gewiss nicht Folge von Gewebszerstörung sind.



Dr. Walter Massing *ist Arzt für Neurologie und Psychiatrie in der psychiatrischen Tagesklinik des Klinikums Hannover.*

Patienten hatte sich genauso entwickelt wie bei den Kontrollpersonen, aber ihre linke Hirnhälfte hinkte deutlich hinterher. Dieser auffällige Befund zeigte sich unabhängig von der ursprünglichen Diagnose des Patienten. Und obwohl der Effekt sich über die gesamte linke Hemisphäre erstreckte, waren die Schläfenregionen am stärksten betroffen – in Übereinstimmung mit unserer ursprünglichen Hypothese.

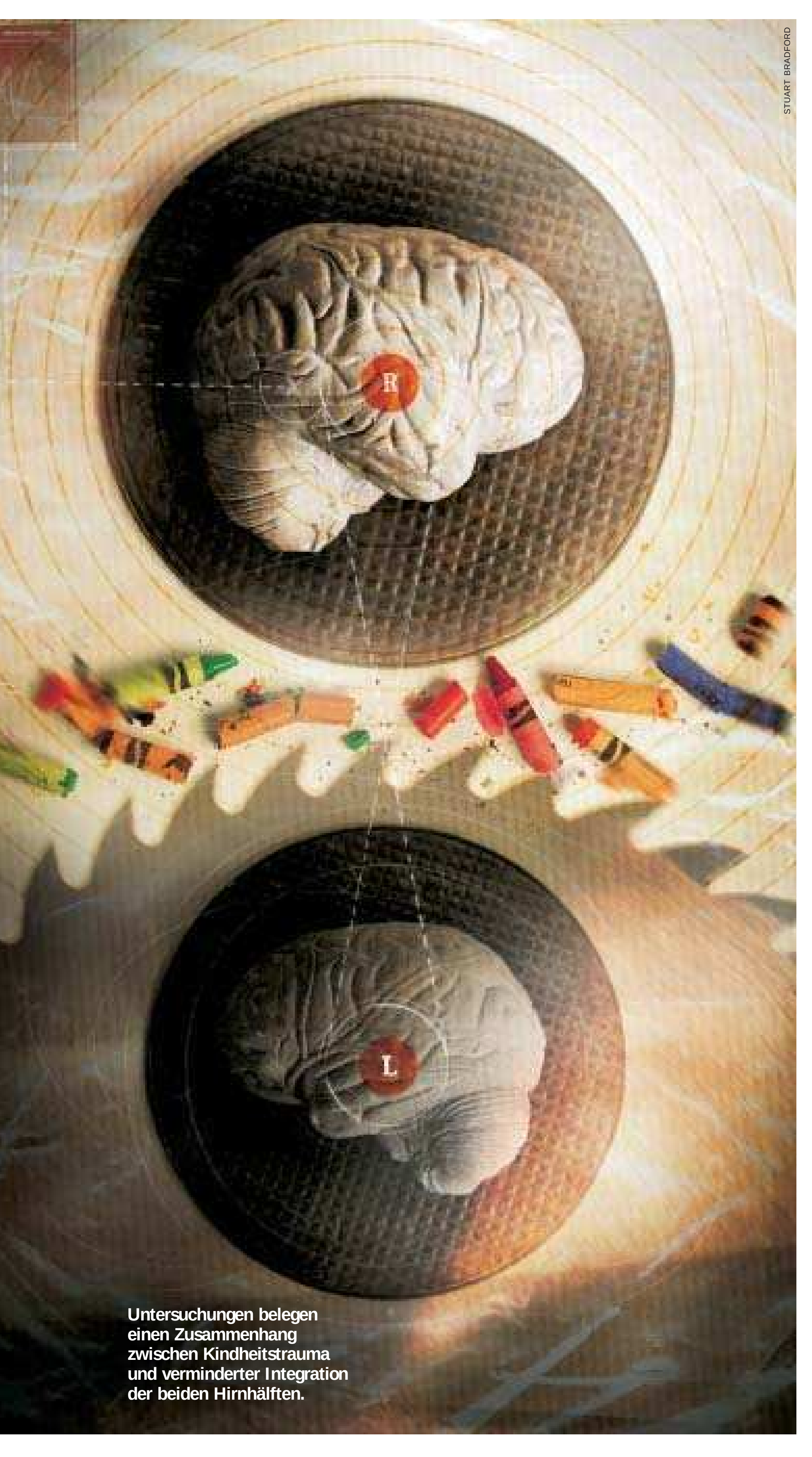
Die linke Hemisphäre ist darauf spezialisiert, Sprache wahrzunehmen und auszudrücken, während die rechte Hemisphäre vor allem räumliche Informationen verarbeitet und sich mit Gefühlen befasst – insbesondere mit negativen Emotionen. Wir wollten wissen, ob misshandelte Kinder ihre traumatischen Erlebnisse in der rechten Hemisphäre speichern und ob eine Wiederbelebung dieser Erinnerungen vorwiegend diese Hirnhälfte aktiviert.

Um diese Hypothese zu prüfen, maß Fred Schiffer 1995 in meinem Laboratorium die hemisphärische Aktivität bei Erwachsenen, während sie sich an ein neutrales Ereignis erinnerten, und dann während der Erinnerung an ein aufwühlendes frühes Erlebnis. Missbrauchsopfer schienen überwiegend ihre linke Hemisphäre zu aktivieren, wenn sie an neutrale Erlebnisse dachten, und ihre rechte, wenn eine frühe traumatische Erinnerung geweckt wurde. Die Personen der Kontrollgruppe nutzten beide Hemisphären stets ungefähr gleich stark; offenbar waren ihre Reaktionen gleichmäßiger auf beide Hirnhälften verteilt.

Verkleinerter Balken

Da Schiffers Untersuchungen anzeigten, dass Kindheitstrauma und verminderte Integration der beiden Hirnhälften zusammenhängen, suchten Andersen und ich 1997 mit Jay Giedd vom National Institute of Mental Health nach einer Störung der wichtigsten Verbindung zwischen den Hirnhälften, dem Balken (Corpus callosum). Tatsächlich fanden wir, dass bei Jungen, die missbraucht oder vernachlässigt worden waren, der Mittelteil des Balkens deutlich kleiner ausfiel als in den Kontrollgruppen. Außerdem hatte bei Jungen Vernachlässigung eine weitaus größere Wirkung als jede andere Art von Misshandlung. Bei Mädchen wirkte sich hingegen sexueller Missbrauch stärker durch eine Verkleinerung des Balkens aus. Diese Ergebnisse wurden 1999 von De Bellis bestätigt und erweitert. Auch Untersuchungen an Menschenaffen, die Mara M. Sanchez von der Emory University durchführte, haben die Wirkung früher Erlebnisse auf die Entwicklung des Balkens untermauert.

Unsere neuen Resultate beruhten auf wegweisenden Studien von Harry F. Harlow von der University of Wisconsin-Madison. In den 1950er Jahren verglich Harlow Affen, die von ihren Müttern aufgezogen worden waren, und Affen, die mit Ersatzmüttern aus Draht und Plüsch vorlieb nehmen mussten. Die mit Attrappen aufgezogenen Affen wurden später sozial ▶



Untersuchungen belegen einen Zusammenhang zwischen Kindheitstrauma und verminderter Integration der beiden Hirnhälften.

auffällig und äußerst aggressiv. Zusammen mit Harlow entdeckte W. A. Mason vom Delta Primate Center in Louisiana, dass diese Folgen weniger schwer ausfielen, wenn die Ersatzmutter, an die sich das Affenbaby klammerte, hin und her geschaukelt wurde. J. W. Prescott vom National Institute of Child Health and Human Development vermutete, diese Bewegung werde zum Kleinhirn übertragen, insbesondere zum mittleren Teil, dem so genannten Wurm (Vermis), der am hinteren Ende des Gehirns direkt über dem Hirnstamm sitzt. Unter anderem moduliert der Wurm die Kerne des Hirnstamms, die die Erzeugung und Freigabe der Neurotransmitter Norepinephrin und Dopamin steuern. Wie der Hippocampus entwickelt sich dieser Hirnteil allmählich und bildet auch nach der Geburt weitere Neuronen. Da er eine noch höhere Rezeptordichte für Stresshormone hat als der Hippocampus, vermag das Einwirken solcher Hormone seine Entwicklung stark zu beeinflussen.

Wenn der Kleinhirnwurm gestört ist

Kürzlich wurde berichtet, dass Anomalien im Kleinhirnwurm mit verschiedenen psychiatrischen Störungen wie manisch-depressiven Erkrankungen, Schizophrenie, Autismus und Hyperaktivitätsstörungen einhergehen. Diese Krankheiten entstehen zwar nicht auf Grund von Kindesmisshandlung, sondern haben genetische und pränatale Ursachen – aber die Tatsache, dass Anomalien des Wurms mit so vielen psychiatrischen Leiden zusammenhängen, lässt vermuten, dass diese Region eine entscheidende Rolle für die seelische Gesundheit spielt.

Die Fehlregulation der vom Kleinhirnwurm gesteuerten Neurotransmitter Norepinephrin und Dopamin kann nicht nur Symptome von Depression, Psychose und Hyperaktivität hervorbringen, sondern auch die Aufmerksamkeit beeinträchtigen. Die Aktivierung des Dopamin-Systems hängt offenbar mit einer Verlagerung zu einem eher linkshemisphärischen – verbalen – Aufmerksamkeitszustand zusammen, während die Aktivierung des Norepinephrin-Systems die Aufmerksamkeit zu einem mehr rechtslastigen – emotionalen – Zustand verschiebt. Am merkwürdigsten ist vielleicht, dass der Wurm auch die elektrische Aktivität im limbischen System mitreguliert und dass seine Stimulierung krampfauslösende Aktivitäten in Hippocampus und Amygdala zu unterdrücken vermag.

In den 1950er Jahren fand R.G. Heath an der Tulane University, dass

Harlows Affen Krampfherde im Dachkern (Nucleus fastigii) des Kleinhirns und im Hippocampus aufwiesen. Später konnte er bei einer kleinen Zahl von Patienten mit unbehandelbaren neuropsychiatrischen Störungen die Häufigkeit von Krampfanfällen senken und die seelische Gesundheit verbessern, indem er den Wurm elektrisch reizte. Das brachte meine Kollegen und mich auf die Idee, Kindesmissbrauch könnte Abnormitäten im Kleinhirnwurm erzeugen, die zu psychiatrischen Symptomen, Übererregbarkeit des limbischen Systems und allmählicher Degeneration des Hippocampus beitragen. Um diese Hypothese zu prüfen, arbeitete Carl M. Anderson mit mir und Perry Renshaw am Brain Imaging Center des McLean Hospital zusammen. Anderson verwendete eine Spielart der so genannten T2-Relaxation, ein neues kernspintomografisches Verfahren, das wir entwickelt hatten. Damit können wir den regionalen Blutdurchfluss im ruhenden Gehirn messen, ohne radioaktive Substanzen oder Kontrastmittel verwenden zu müssen.

Befindet sich das Gehirn im Ruhezustand, gibt es eine enge Übereinstimmung zwischen der neuronalen Aktivität einer Hirnregion und der Blutmenge, die diese Region zum Aufrechterhalten ihrer Aktivität empfängt. Anderson fand eine deutliche Korrelation zwischen der Aktivität im Kleinhirnwurm und dem Grad limbischer Erregbarkeit, den mein TLE-Fragebogen anzeigte – sowohl für junge gesunde erwachsene Kontrollpersonen als auch für junge Erwachsene mit einer Vorgeschichte wiederholten sexuellen Missbrauchs.

Doch wie stark oder schwach die limbischen Symptome jeweils auch waren, der Blutdurchfluss im Kleinhirnwurm war bei Individuen mit einem früheren Trauma deutlich vermindert. Ein verminderter Blutdurchfluss weist auf eine Funktionsstörung des Wurms hin. Missbrauchte Patienten hatten vermutlich deshalb tendenziell höhere Punktzahlen im Fragebogen, weil ihr Kleinhirnwurm nicht ausreichend aktiv sein konnte, um höhere Erregungsniveaus des limbischen Systems zu unterdrücken.

Insgesamt legen diese Befunde ein faszinierendes Modell dafür nahe, wie eine Borderline-Persönlichkeitsstörung entstehen kann. Unzureichende Integration der Hirnhälften und ein verkleinerter Balken lassen diese Patienten unvermittelt von links- zu rechtshemisphärisch dominierten Zuständen wechseln – mit höchst unterschiedlichen emotionalen Wahrnehmungen und Erinnerungen. Eine derart einseitige Hemisphärendominanz könnte einen Menschen veranlassen, Freunde, Familie und Mitarbeiter abwechselnd übertrieben positiv und überwiegend negativ zu sehen – ein typisches Kennzeichen dieser Störung. Außerdem kann die elektrische Reizbarkeit des limbischen Systems Symptome von Aggression, Verbitterung und Angst erzeugen. Ungewöhnliche EEG-Aktivität im Schläfenlappen wird auch häufig bei Menschen mit stark erhöhtem Suizidrisiko und selbstzerstörerischem Verhalten beobachtet.

Schädliche Anpassung

Unser Team verfolgte anfangs die Hypothese, Stress in der Kindheit wirke wie ein Gift, das die normale, harmonisch abgestimmte Hirnentwicklung stört und bleibende psychiatrische Probleme erzeugt. Frank W. Putnam vom Children's Hospital Medical Center in Cincinnati und Bruce D. Perry vom Alberta Mental Health Board in Kanada haben inzwischen dieselbe Hypothese formuliert. Doch ich bezweifle unterdessen unsere Ausgangshypothese. Das menschliche Gehirn ist entwicklungsgeschichtlich darauf angelegt, durch Erfahrung geprägt zu werden, und extreme Not in früher Kindheit war im Laufe unserer Evolution eher die Regel. Ist es plausibel, dass das kindliche Gehirn niemals an Misshandlung angepasst wurde und dadurch jedes Mal erneut bleibend geschädigt wird? Das scheint sehr unwahrscheinlich. Die logische Alternative ist: Die frühe Stresserfahrung erzeugt molekulare und neurobiologische Effekte, welche die neurale Entwicklung in angepasster Weise so ändern, dass das Gehirn des Erwachsenen zu überleben und sich in einer gefährlichen Welt fortzupflanzen vermag.

Welche Eigenschaften oder Fähigkeiten könnten unter den widrigen Bedingungen der Frühzeit günstig für das Überleben gewesen sein? Offensichtlich galt es, bei Bedarf eine intensive Kampf- oder Fluchtreaktion in Gang zu setzen, auf eine Herausforderung ohne Zögern aggressiv zu reagieren, bei Gefahr sofort in höchster Alarmbereitschaft zu sein und kräftige Stressreaktionen zu erzeugen, um das Heilen von Verletzungen zu beschleunigen. In diesem Sinne können wir die von uns beobachteten Hirnveränderungen als Anpassung an eine feindliche Umwelt interpretieren.

Diese Anpassung hilft zwar dem betroffenen Individuum, sicher durch die für den evolutionären Erfolg entscheidenden Jahre der Fortpflanzungsfähigkeit zu gelangen – und erhöht wahrscheinlich sogar die sexuelle Promiskuität –, doch der Preis dafür ist hoch. McEwen vermutet, dass die Überaktivierung von Stressreaktionssystemen, so nötig sie für kurzfristiges Überleben sein mag, das Risiko von Fettsucht, Zuckerkrankheit und Bluthochdruck erhöht, zu einer ganzen Reihe psychiatrischer Probleme inklusive erhöhten Suizidrisikos führt und dass sie die Alterung und Degeneration des Hippocampus und anderer Hirnstrukturen beschleunigt.

Wir nehmen an, dass unser Gehirn ohne intensiven frühkindlichen Stress und bei angemessener Erziehung eine Entwicklung nimmt, die zu einem weniger aggressiven und emotional ausgeglichenen Erwachsenen führt, der sich sozial und mitfühlend verhält. Dieser Vorgang ermöglicht es uns sozialen Wesen, komplexe zwischenmenschliche Beziehungen einzugehen und unser kreatives Potenzial besser zu nutzen.

Die Gesellschaft erntet, was sie sät – in der Weise, wie sie ihre Kinder aufzieht. Stress prägt dem Gehirn verschiedene zwar angepasste, aber antisoziale Verhaltensweisen ein. Körperliche, emotionale oder sexuelle Misshandlung, aber auch das frühe Erleben von Krieg, Hungersnot oder Seuchen können hormonelle Änderungen auslösen, die das kindliche Gehirn dauerhaft so verdrahten, dass es mit einer böswilligen Welt fertig zu werden vermag. Auf diese Weise pflanzen sich Gewalt und Missbrauch von einer Generation zur nächsten und von einer Gesellschaft zur anderen fort.

Für uns folgt aus alledem zwingend, dass viel mehr getan werden muss, damit Kindesmissbrauch erst gar nicht stattfindet. Denn wenn die geschilderten Veränderungen im Gehirn einmal eingetreten sind, ist der Schaden nicht wieder gutzumachen. ■

Martin H. Teicher *ist außerordentlicher Professor für Psychiatrie an der Harvard Medical School. Er leitet das Developmental Biopsychiatry Research Program am McLean Hospital in Belmont (Massachusetts) sowie das dortige Developmental Psychopharmacology Laboratory.*

Literaturhinweise

Wounds That Time Won't Heal: The Neurobiology of Child Abuse. Von Martin H. Teicher in: Cerebrum (Dana Press), Bd. 2, S. 50 (2000).

Developmental Traumatology, Part 2: Brain Development. Von M.D. De Bellis et al. in: Biological Psychiatry, Bd. 45, S. 1271 (1999).

Weblinks finden Sie bei **www.spektrum.de** *unter „Aktuelles Heft".*

Sonnenschutzmittel

Die Haut schützt den Körper vor schädlichen Einflüssen der Umwelt, darunter auch vor der ultravioletten (UV-)Strahlung der Sonne. Dringen deren energiereiche Photonen ungehindert in die Haut, können sie ihre Zellen schädigen – das Gewebe entzündet sich. Dabei erweitern sich Blutgefäße in den tieferen Schichten und die Haut rötet sich. Wer sich häufiger einem solchen Sonnenbrand aussetzt, läuft Gefahr, an Hautkrebs zu erkranken, denn die Strahlung schadet auch der Erbsubstanz (DNA) in den Zellen. Zudem lässt ultraviolette Strahlung das Gewebe schneller altern.

Um sich zu schützen, bildet die Oberhaut (Epidermis) das Pigment Melanin, das UV-Licht absorbiert. Es verleiht eine bräunliche Farbe. Dunkelhäutige Menschen haben genetisch bedingt mehr Melanin als hellhäutige und bekommen daher nicht so leicht einen Sonnenbrand, während Menschen mit roten Haaren meist eine helle, sehr empfindliche Haut haben.

Sonnenschutzmittel enthalten UV-Licht-filternde Substanzen. Diese verlängern die Zeit, die man unbeschadet in der Sonne bleiben kann, um den so genannten Lichtschutzfaktor (LSF). Die Messung dieser Werte wurde in Europa in den 1990er Jahren durch die European Cosmetic, Toiletry and Perfumery Association (COLIPA) standardisiert. Tritt bei unbehandelter Haut zum Beispiel nach zehn Minuten eine Rötung auf, so ist die Entzündung bei einer Sonnenschutzcreme mit LSF 15 erst nach 150 Minuten zu sehen. Die Angaben gelten aber nur für den als UV-B bezeichneten Anteil der Strahlung mit einer Wellenlänge von 280 bis 320 Nanometer (millionstel Millimeter) – der auch die Melanin-Bildung anregt – und zudem nur für einen dicken Auftrag des Mittels von zwei Milligramm pro Quadratzentimeter.

Für so genannte UV-A-Strahlen (Wellenlänge 320 bis 400 Nanometer) verlangt ein australischer Standard, dass mindestens neunzig Prozent davon absorbiert werden müssen; viele handelsübliche Sonnenschutzmittel erfüllen diese Anforderung.

Neuere Entwicklungen bringen Mikropigmente aus Titandioxid oder Zinkoxid in die Lotion ein. Sie sollen wie winzige Spiegel beide Anteile des ultravioletten Spektrums reflektieren, also einen Breitbandschutz bieten. Bislang aber gilt: Einen wirklichen Sunblocker gibt es nicht.

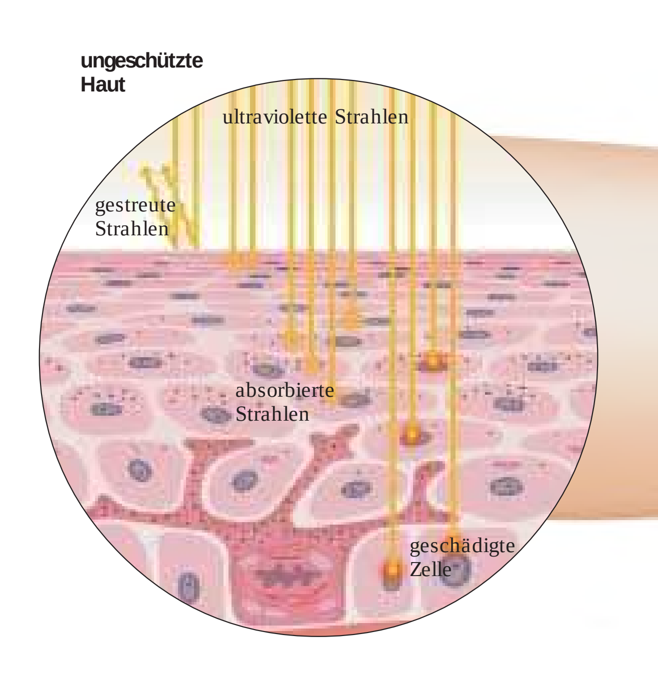
Übertriebene Hoffnungen setzen manche auf Zusätze von Vitamin C, E und Beta-Carotin. In der besonnten Haut entstehen nämlich auch Sauerstoff-Radikale, die chemische Bindungen aufbrechen und so Schaden anrichten können. Die genannten Vitamine sind Anti-Oxidanzien, können also die Schädlinge abfangen. Was UV-Strahlung anrichtet, beruht aber nur zu einem geringen Prozentsatz auf Radikalbildung. Zudem fehlen Beweise dafür, dass die Vitamine in aktiver Form in die Haut gelangen.

Wie soll man sich wirkungsvoll vor der Sonne schützen? Am besten durch Vermeiden der Exposition, auf Rang zwei steht ein lichtdichtes Hemd (in Australien wird Kleidung ein Lichtschutzfaktor zugewiesen, für Europa soll eine Prüfnorm geschaffen werden). Da sich die Zellschäden akkumulieren – viele kurze Strandgänge haben einen vergleichbaren Effekt wie ein entsprechend längerer –, wird empfohlen, Hände und Gesicht täglich mit einem Sonnenschutzmittel oder einer Feuchtigkeitscreme mit Sonnenschutz einzureiben.

Sonnenanbeter und Solarienfetischisten dürften derlei nicht gerne hören. Für sie sei noch angemerkt, dass langwelliges UV-A-Licht, das Solarienröhren verstärkt emittieren, tiefer in die Haut eindringt und dort die elastischen Bindegewebsfasern zerstört – die Haut altert schneller. Zudem lässt sich ein Krebsrisiko dieser Komponente bislang keineswegs ausschließen.

*Der Autor **Mark Fischetti** ist freier Mitarbeiter bei Scientific American.*





Sonnenschutz versus Bräunungsöl

Die Hautoberfläche ähnelt einem Miniaturgebirge, das einen kleinen Teil der auftreffenden UV-Strahlen wegstreut. Die meisten dringen aber in die Oberhaut (Epidermis) ein. Das Pigment Melanin kann nur einen Teil davon absorbieren. Sonnenschutzmittel filtern zusätzlich UV-Strahlen heraus. Bräunungsöle hingegen glätten die Hautoberfläche, sodass weniger Strahlen gestreut werden und mehr eindringen; so wird entweder ein Sonnenbrand oder die erwünschte Bräunung beschleunigt.

Wussten Sie schon … ?

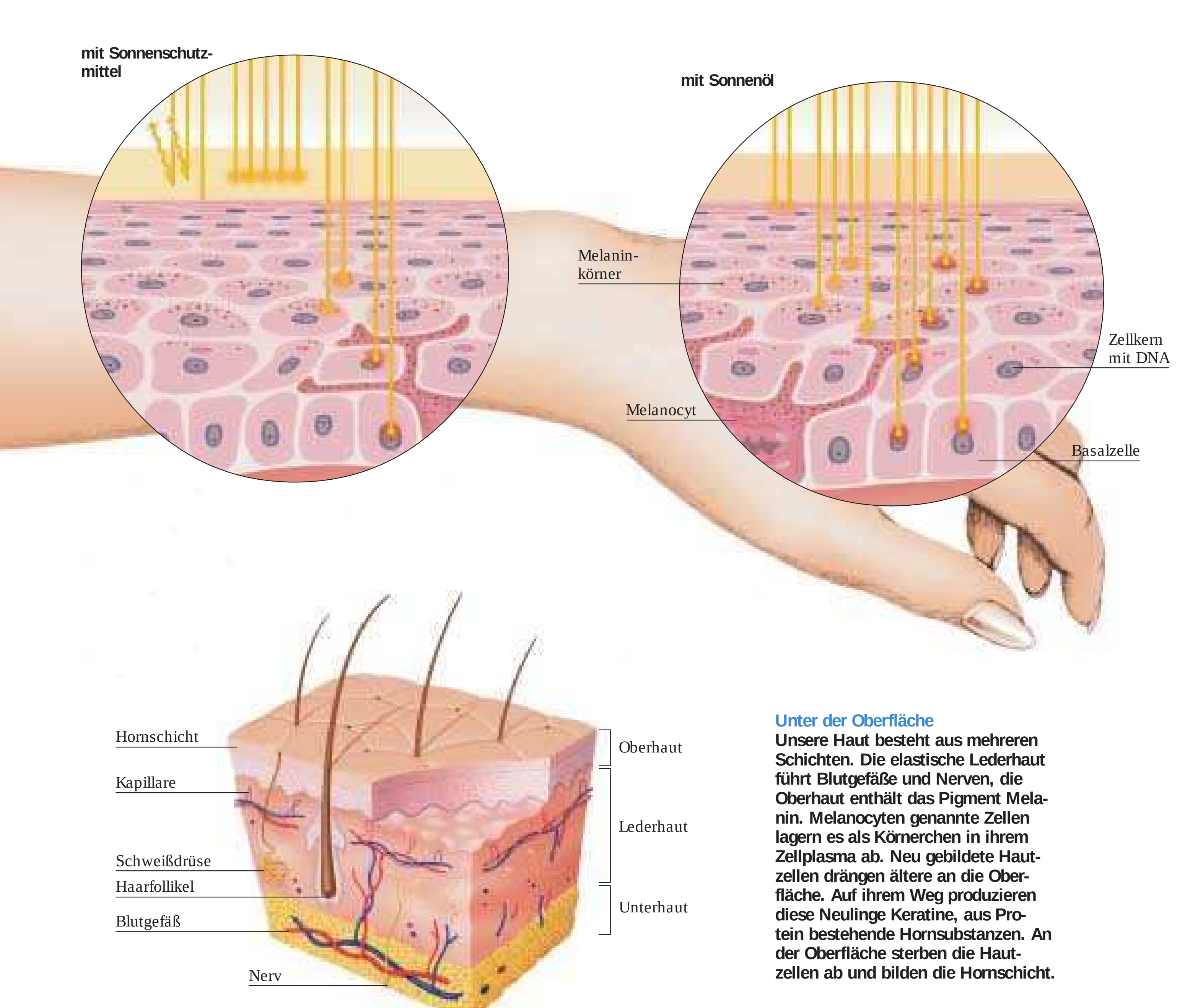
➤ Die Varianten des Pigments Melanin absorbieren auch sichtbares Licht. Je mehr man von dem braunen Eumelanin hat, umso dunkler erscheint deshalb die Hautfarbe. Rothaarige produzieren mehr rotes und gelbes Phäomelanin. Weil es das UV-Licht weniger gut absorbiert, bekommen sie eher einen Sonnenbrand und bräunen weniger. Kinder haben in der Regel noch sehr dünne Haut und sind daher ohne Schutz in der Sonne stärker gefährdet als Erwachsene.

➤ Ein weißes T-Shirt bietet einen Lichtschutzfaktor (LSF) von etwa vier. Der Weichspüler Exelia Suncare umhüllt die Fasern laut Werbung mit einem UV-Licht absorbierenden Film, der nach zehnmaliger Anwendung einen LSF von 30 erreicht.

➤ Bräunungssprays und -lotionen enthalten Dihydroxyaceton (DHA), das sich auf der äußersten Hautschicht mit Aminosäuren verbindet und so, ganz ohne Sonne, eine synthetische Bräune hervorruft. Solche Selbstbräuner machen ebenso wie Après-Lotion zum Auftragen nach dem Sonnenbad etwa zwanzig Prozent des Marktes aus, Tendenz steigend. Doch Achtung: Die Mittel bieten keinen UV-Schutz!

➤ „Meine Damen und Herren der Abschlussklasse 1997, benutzt Sonnenschutz“, begann Kolumnistin Mary Schmich eine Rede, die in der Chicago Tribune erschien und sogar vertont wurde. „Die langfristigen Vorteile sind durch Wissenschaftler bewiesen. Meine restlichen Vorschläge beruhen lediglich auf Erfahrung.“ Es folgen nette Weisheiten wie „Hebt Eure alten Liebesbriefe auf, schmeißt die Kontoauszüge weg.“ „Schont Eure Kniegelenke, Ihr werdet sie vermissen, wenn sie kaputt sind.“ Sie schloss: „Seid vorsichtig, wessen Ratschläge Ihr annehmt. … Doch den einen nehmt an: Sonnenschutz!“ Die ganze Rede plus Vertonungen gibt es unter http://www.thesunscreenman.com/html/sonn0301.htm

ILLUSTRATIONEN: GEORGE RETSECK



Unter der Oberfläche
Unsere Haut besteht aus mehreren Schichten. Die elastische Lederhaut führt Blutgefäße und Nerven, die Oberhaut enthält das Pigment Melanin. Melanocyten genannte Zellen lagern es als Körnerchen in ihrem Zellplasma ab. Neu gebildete Hautzellen drängen ältere an die Oberfläche. Auf ihrem Weg produzieren diese Neulinge Keratine, aus Protein bestehende Hornsubstanzen. An der Oberfläche sterben die Hautzellen ab und bilden die Hornschicht.

Inhalt

TECHNOLOGIE-REPORT

Moderne Endoskopie

Zielgerichtet führen Chirurgen Lichtleiter, Zangen und Scheren durch Hightech-Röhrchen zum Krankheitsherd. Den Patienten bleibt ein massiver Eingriff erspart, der Arzt muss sich allerdings mit einem Schlüssellochblick auf das Operationsgebiet begnügen. Doch zum Glück gibt es Computer.

VIRTUELLE ENDOSKOPIE

Krebsvorsorge durch Computersimulation

Eine Dickdarmspiegelung ist kein Vergnügen. Bildverarbeitung und virtuelle Realität bieten vielleicht eine Alternative.

Von Karl-Hans Englmeier, Maximilian Reiser und Georg-Friedmann Rust

Bis zu neunzig Prozent der Darmtumoren ließen sich nach Expertenmeinung verhindern, gelänge es, die Polypen genannten Wucherungen der Darmschleimhaut aufzufinden und zu entfernen – sie gelten als mögliche Krebsvorstufen. Überhaupt wissen Ärzte: Je früher Darmkrebs entdeckt wird, desto größer sind die Heilungschancen. Doch leider macht er sich im Frühstadium selten durch Symptome bemerkbar. Mitunter gibt der Tumor aber bereits winzige Mengen Blut in den Darm (Kolon) ab, ebenso manche Polypen. Mit bloßem Auge sind sie nicht zu sehen, doch ein Haemoccult-Test kann sie nachweisen.

Hat der ein positives Ergebnis, beginnt für den Patienten eine unangenehme diagnostische Routine: Ein Facharzt muss die Darmschleimhaut untersuchen. Diese Koloskopie verläuft oft schmerzhaft. Doch wir wollen durch Computersimulation und virtuelle Realität eine schonendere Alternative bieten.

Für eine herkömmliche Darmspiegelung muss der Darm leer und sauber sein. Zu diesem Zweck trinkt der Patient drei bis vier Liter einer Spüllösung. Das Endoskop beziehungsweise Koloskop besteht aus einem etwa zehn bis fünfzehn Millimeter dicken Schlauch von 1,5 Metern Länge, der einen Glasfiber-Lichtleiter mit Kameraoptik sowie einen Arbeitskanal enthält; durch diesen werden medizinische Geräte eingeführt, um Gewebeproben zu nehmen oder Polypen abzutragen.

Dieser Schlauch wird vom After aus in den Darm vorgeschoben. Um die innere Oberfläche deutlich zu sehen und zu filmen, wird Luft eingeblasen und das Organ aufgedehnt – frei von Stuhl fällt er sonst in sich zusammen. Trotz Beruhigungsspritze und Schmerzmittel leiden nicht wenige Patienten unter diesen Maßnahmen, und manch einer meidet deshalb den Arztbesuch, obwohl er dringend erforderlich wäre.

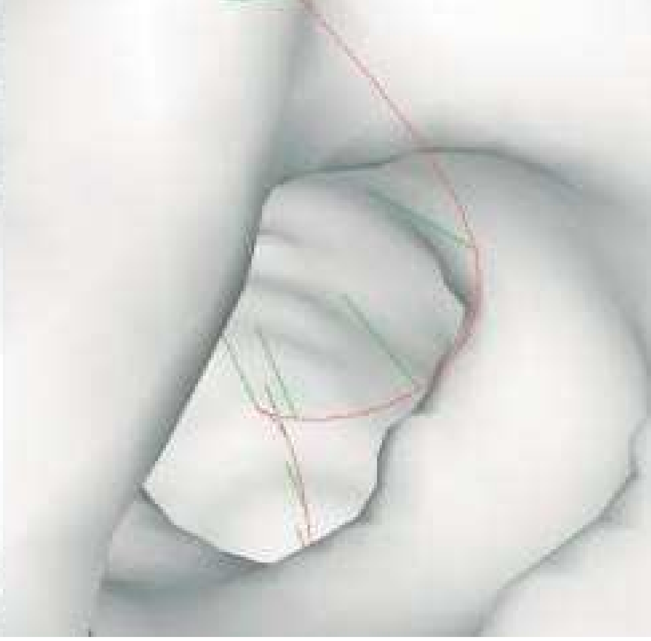
Die virtuelle Koloskopie simuliert das Einschieben des Endoskops, dazu verwertet sie allerdings Daten einer Computertomografie. Auch das erfordert eine vorhergehende Darmreinigung und ebenfalls das Einblasen von Luft.

Der Computertomograf röntgt den gesamten Bauch und berechnet danach die Gewebestrukturen. Dazu wird das Volumen in winzige Quader (Voxel) unterteilt, deren Kanten 0,7 beziehungsweise 1 Millimeter lang sind. Die Untersuchung erfolgt in Rückenlage. Befindet sich noch viel Spüllösung im Darm, schließt sich eine zweite Aufnahme in Bauchlage an, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Die so genannten Multidetektor-Spiral-Computertomografen (MDCT, im Folgenden kurz CT) sind in der Lage, in kürzester Zeit in der Körperlängsachse Schnittbilder im Abstand von nur 0,7 bis 1 Millimeter aufzunehmen. Pro Bild sind dafür nur durchschnittlich 12,5 Millisekunden notwendig, sodass ein solches Gerät bei einem Atemanhalten 400 bis 800 Einzelschichten erfasst.

Die reine Untersuchungszeit im CT verkürzt sich auf maximal eine halbe Minute und ist damit erheblich schneller im Vergleich zu Geräten der älteren Generation (Ein-Detektor-Systeme). Die gesamte Untersuchung inklusive der Luftfüllung benötigt zwischen fünf und zehn Minuten. Spezielle mathematische Verfahren bei der Datenverarbeitung ermöglichen die für die Aufnahme notwendige Intensität der Röntgenstrahlung bis auf ein Vierzehntel zu reduzieren.

Aus den so gewonnenen Daten berechnet der Computer die Ansichten der Darmschleimhaut, wie sie ein Koloskop sehen würde. Das virtuelle Instrument trägt eine virtuelle Lichtquelle. Reflexio-

ALLE BILDER DES BEITRAGS: GSF / KLINIKUM GROSSHADERN

Die Zentrallinie (rot) im berechneten 3D-Röntgenbild des Darms führt die virtuelle Kamera (rechts, grün dargestellt die Abstände von der Darmwand).

nen auf der Schleimhaut lassen sich dann ebenso berechnen wie die Schattenbildung durch die Falten des Darmes. Auf diese Weise werden realistisch wirkende Abbilder der Darmwand errechnet, die der Arzt via Monitor begutachten kann.

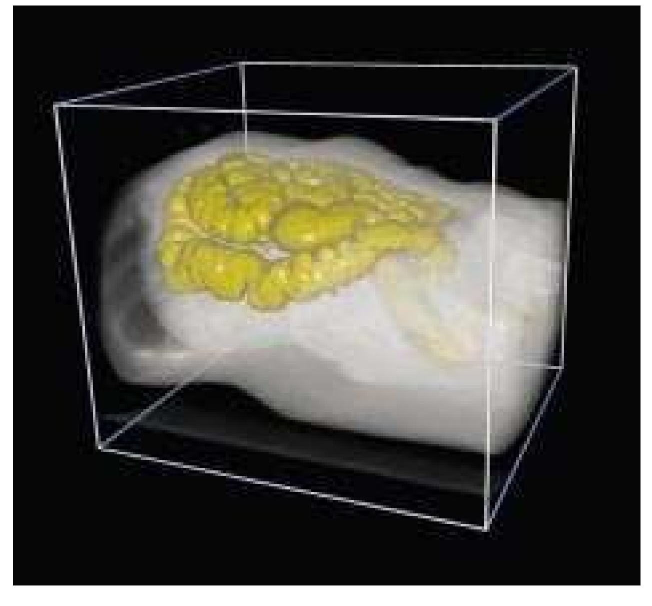
Der gesamte Prozess ist sehr rechenintensiv und erfordert beispielsweise eine vorhergehende „Segmentierung“: Aus den CT-Daten des Bauches arbeitet ein Algorithmus das Volumen des Darms heraus. Von einem Startvoxel im Enddarm beginnend sucht er selbstständig luftgefüllte Bereiche bis zum Beginn des Dickdarms. Im Zentrum des Darmquerschnitts wird sodann eine zentrale Linie bestimmt. Sie sollte stets einen möglichst großen Abstand zur Darmwand haben sowie glatt und ohne Unterbrechungen verlaufen. Die virtuelle Kamera fährt dann später entlang dieser Linie und nimmt in kurzen Abständen ihre Bilder auf (siehe oben). Ein hochauflösender Monitor, wie häufig in der klinischen Routine angewandt, oder ein so genannter Datenhelm mit zwei kleinen Monitoren zeigt dann die Innenansichten der Darmwand.

Allerdings weist diese simulierte Darmspiegelung ähnliche Nachteile auf wie eine konventionelle: Sie zeigt nicht die gesamte Schleimhautoberfläche, weil es zum Beispiel nicht möglich ist, bei der Sicht in „Fahrtrichtung“ hinter die typischen Falten zu blicken. Deshalb berechnet unser Programm zusätzlich einen Blick von der virtuellen Kamera senkrecht gegen die Schleimhaut. Der zugehörige Abstand von der zentralen Linie ergibt umgekehrt ein Relief der Oberfläche oder eine Darstellung der Entfernung in Grauwerten. Wo Polypen die Linie stark krümmen, lässt sich in einer solchen Darstellung unmittelbar erkennen. Die virtuelle Kamera kann vom Arzt per Mausklick an solche Stellen positioniert werden.

Selbst auf der Basis der Daten älterer CT-Geräte erkennen Ärzte in den virtuellen Bildern nicht weniger Darmtumoren als mit der konventionellen, wie klini- ▶

STICHWORT

Das Endoskop ist ein medizinisches Instrument, das in erster Linie der Diagnose dient: Es erlaubt, natürliche oder operativ angelegte Körperhöhlen in Augenschein zu nehmen. Gängige Praxis sind etwa Bauch-, Knie- und Darmspiegelungen, neuere Anwendungen findet die Endoskopie unter anderem in der Hand-, Herz- und Neurochirurgie. Das Instrument besteht aus starren Röhren oder flexiblen Schläuchen, über die ein Chirurg Lichtleiter und Optik zu dem Untersuchungsgebiet führt. Zusätzliche Arbeitskanäle im oder am Endoskop bringen miniaturisierte chirurgische Instrumente vor Ort – aus der Diagnostik wird die minimalinvasive Chirurgie.



Im CT-Datensatz separiert ein Algorithmus Bild für Bild den luftgefüllten Dickdarm vom umgebenden Gewebe. Aus dem gesamten Datenvolumen entsteht dann eine räumliche Darstellung des Darmes.

sche Studien weltweit zeigen. Bei Darmpolypen größer als ein Zentimeter waren es 91 Prozent, bei solchen zwischen sechs und neun Millimeter Größe immerhin 82 Prozent. Eigene Untersuchungen mit moderneren Tomografen an Hochrisikopatienten – also Patienten mit Blut im Stuhl – ergaben noch höhere Erkennungsraten für Polypen von 96 beziehungsweise 90 Prozent im Vergleich zur „wirklichen“ Endoskopie.

Solche Vergleiche geben paradoxerweise sogar ein etwas zu schlechtes Bild ab, weil sie dem neuen Verfahren anlasten, Fehler der herkömmlichen Untersuchung nicht zu machen. Denn auch diese ist nicht perfekt, sie übersieht etwa 5 bis 15 Prozent der Polypen, von denen aber einige beispielsweise durch die Auswertung des Darmreliefs gefunden werden. Weil aber die konventionelle Koloskopie bei einer solchen Gegenüberstellung als Maßstab genommen wird, ergibt ein solcher Fall die Wertung falsch positiv für die virtuelle Variante. Unseres Erachtens liefern beide Verfahren durchaus vergleichbare Ergebnisse, bei kleineren Polypen mag die Simulation sogar besser abschneiden.

Es gibt einige Fehlerquellen, die falsche Befunde begünstigen. So können verbleibende Stuhlreste im Dickdarm nicht immer sicher von Polypen unterschieden werden. Deshalb muss Kontrastmittel gespritzt werden, das sich im Gewebe anreichert, oder man gibt der Trink-Spüllösung Kontrastmittel zu, das sich in Stuhlresten sammelt. Bei Auffälligkeiten wird sich der Arzt zudem nicht auf die räumliche Darstellung allein verlassen, sondern die Schnittbilder der Tomografie zu Hilfe nehmen, um die Diagnose abzusichern. Lässt sich auch damit ein Verdacht nicht abklären, muss eine konventionelle Koloskopie erfolgen, nicht zuletzt, um dabei gegebenenfalls eine Gewebeprobe zu nehmen. ■



Virtueller Einblick in den Darm: Der Pfeil in der Mitte weist auf einen Tumor, der unten links auf einen kleinen Polypen.





Karl-Hans Englmeier *(links) leitet die Arbeitsgruppe „Bildverarbeitung und Virtuelle Realität“ im GSF Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit in Neuherberg. Er ist zudem Privatdozent für Medizinische Informatik an der Ludwigs-Maximilians-Universität (LMU) in München.* ***Maximilian Reiser*** *(Mitte) ist Geschäftsführender Direktor des Instituts für Klinische Radiologie des Klinikums Großhadern an der LMU,* ***Georg-Friedemann Rust*** *ist dort Radiologe.*

Literaturhinweise

Abklärung hereditärer Tumorerkrankungen des Kolons und Rektums. Von J. D. Roder in: TZM-NEWS, G. Riethmüller (Hg.). Tumorzentrum München, Januar 2000.

A comparison of virtual and conventional colonoscopy for the detection of colon polyps. Von H. M. Fenlon et al. in: New England Journal of Medicine, Bd. 341, Heft 20, S. 1496, November 1999.

DIAGNOSTIK I

Biopsie ohne Schnitt

Jede Entnahme von Gewebe ist eine Operation. Neue bildgebende Verfahren, mittels Endoskop vor Ort eingesetzt, sollen die Krebsdiagnostik verbessern und manche Biopsie ersetzen.

Von Frank König

Krebs steht in der Liste der Todesursachen in Deutschland nach wie vor auf Platz zwei. Als eine der wichtigsten Gegenmaßnahmen gilt die Früherkennung von Karzinomen. Sie zu verbessern ist ein Schwerpunkt der Onkologen.

Der Endoskopie kommt dabei bereits eine wichtige Rolle zu, ermöglicht sie doch, verdächtige Prozesse in Hohlorganen wie der Blase, dem Darm, der Lunge oder dem Magen zu untersuchen: Mittels endoskopisch eingeführter Instrumente entnimmt der Arzt Gewebeproben, die ein Pathologe unter dem Mikroskop analysiert. Dieser stuft das Gewebe nach seiner Bösartigkeit und hinsichtlich seiner Eindringtiefe (*Grading* beziehungsweise *Staging*) ein. Beide Angaben beeinflussen die Therapie: Je bösartiger (maligner) eine Geschwulst ist und je tiefer sie bereits in das umliegende Gewebe eingedrungen ist, desto größer muss zum Beispiel das zu entfernende oder zu bestrahlende Volumen sein und desto aufwendiger ist die Nachsorge.

Voraussetzung für ein exaktes *Staging* ist bislang eine Gewebeentnahme (Biopsie), die alle Schichten des untersuchten Hohlorgans erfasst. Doch sie hat ihre Grenzen: Dass der Tumor nicht schon tiefere Bereiche befallen hat, kann der Pathologe anhand der Probe leider oft nicht ausschließen. So mag sie bei der Entnahme beschädigt worden sein oder der Chirurg hat, um Komplikationen zu vermeiden, nicht ausreichend tief geschnitten. Bei unvollständiger Entnahme der Geschwulst kann der Tumor aber wieder auftreten (Rückfall, Rezidiv) beziehungsweise zunächst unbemerkt weiterwachsen. Darüber hinaus diskutieren Experten das Risiko, durch die Biopsie Tumorzellen im noch gesunden Gewebe zu verteilen.

Es besteht deshalb ein großes Interesse an einer „optischen Biopsie“, also an einer Technik, durch bildgebende Verfahren den Zustand einer Geschwulst weitgehend zu erfassen. Das erfordert die Kombination eines sensitiven Verfahrens zur Lokalisation des Tumors mit einem *Staging*- und einem *Grading*-Verfahren.

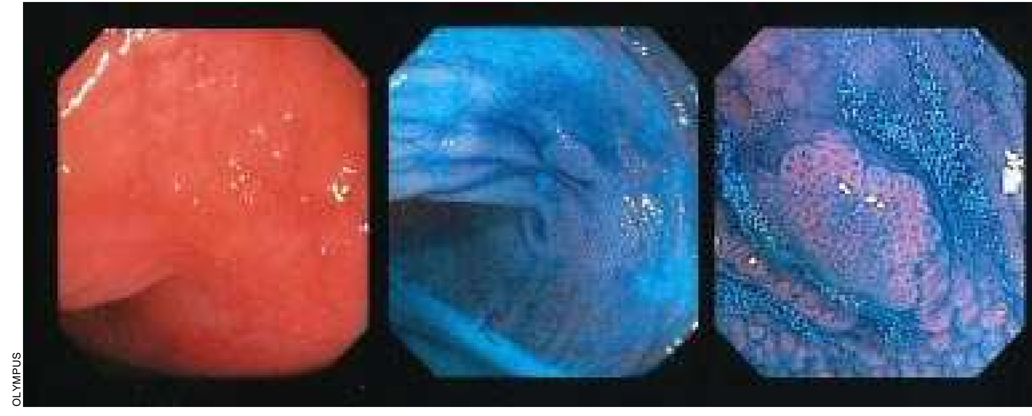
Ersteres gelingt beispielsweise mit Hilfe von Fluoreszenzmarkern. Diese Stoffe reichern sich in dem entarteten Gewebe an und fluoreszieren unter Bestrahlung mit Licht einer bestimmten Wellenlänge. So lassen sich sehr kleine

Tumorherde und bösartige Gewebe mit all ihren Ausläufern erkennen, ebenso Tumor-Vorstufen. An vorderster Front bei der Entwicklung dieser Technik arbeitet das Team von Reinhold Baumgartner und Herbert Stepp am Laser-Forschungslabor des Klinikums Großhadern in München.

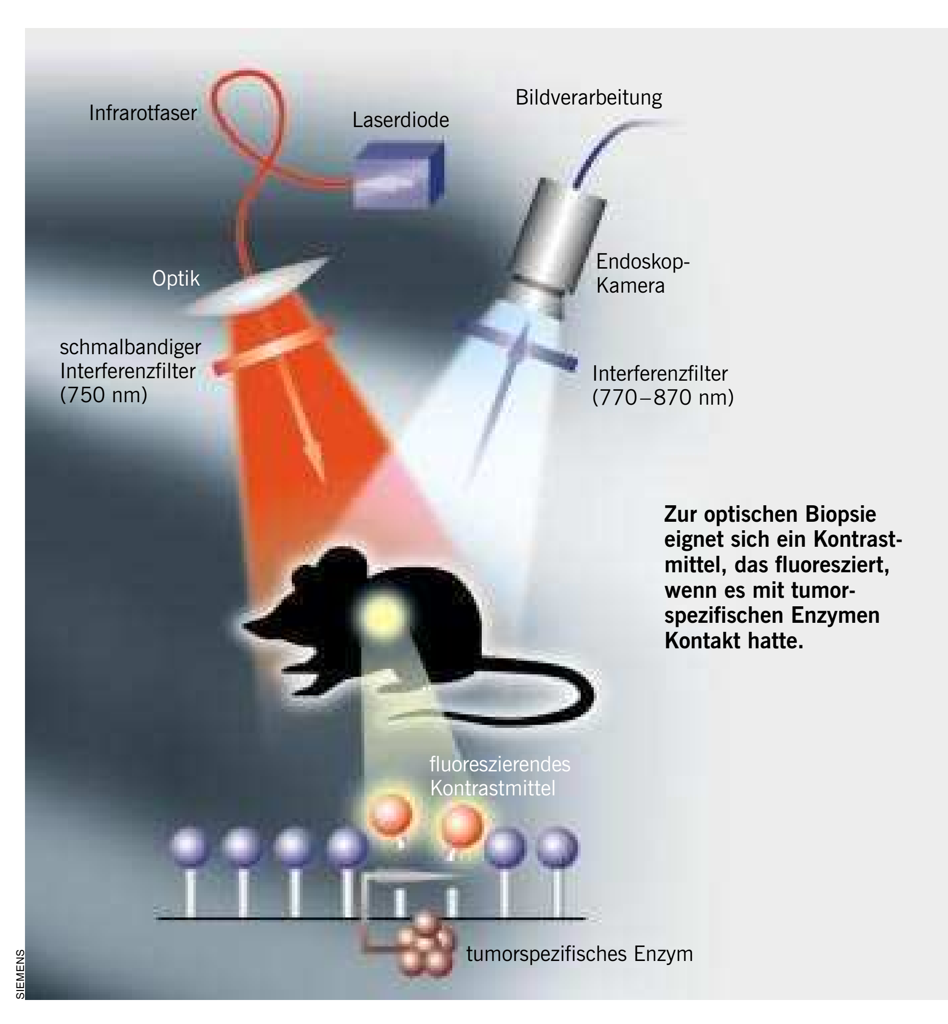
Sind verdächtige Areale ausgemacht, müssen sie mit anderen, gewebespezifischen Verfahren charakterisiert werden. Dazu gehört die optische Kohärenztomografie (OCT, siehe den Artikel auf Seite 92) und/oder der hochauflösende Ultraschall. Durch den Einsatz von Minisonden werden Schallwellen hoher Frequenz (10–30 MHz) über das Endoskop auf das Gewebe übertragen. Die verschiedenen Gewebestrukturen reflektieren den Ultraschall in unterschiedlicher Intensität und erzeugen so auf dem Ultraschallgerät hochaufgelöste Schwarzweißbilder, die eine Analyse der einzelnen Gewebeschichten erlauben. Beide Methoden, OCT und Ultraschall, lassen sich über Endoskope vor Ort anwenden und erlauben möglicherweise ein unmittelbares *Staging* von Tumoren. Der entsprechende klinische Test läuft derzeit in der Urologischen Klinik der Charité (Berlin), zunächst an Patienten mit Blasenkarzinomen.

Um nun noch die Bösartigkeit des veränderten Gewebes zu bestimmen, bedarf es zudem einer mikroskopischen Untersuchung. Dazu werden derzeit im Wesentlichen zwei Strategien verfolgt. Zum einen die Entwicklung von miniaturisierten konfokalen Mikroskopen, welche in ein Endoskop integriert werden können und so eine direkte Mikroskopie ermöglichen. Zum anderen gelingt die Übertragung der Endoskopiebilder über spezielle Faserbündel auch auf herkömmliche konfokale Mikroskope. Die Entwicklung der endoskopischen Mikroskopie für den klinischen Einsatz ist derzeit Forschungsschwerpunkt in der Sektion für Minimal Invasive Chirurgie (MIC) an der Universität in Tübingen. Erste Untersuchungen durch Joachim Knittel und Ludger Schnieder an Darmtumoren sind viel versprechend, der klinische Einsatz rückt in greifbare Nähe.

Eine optische Biopsie hätte mehrere entscheidende Vorteile. Im Gegensatz zur herkömmlichen Biopsie würde kein Gewebe zerstört, und Tumorzellen könnten somit nicht gestreut werden. Auch ließe sich das Karzinom mit den genannten bildgebenden Methoden dreidimensional begutachten. Durch verschiedene automatisierte Bildanalysen wäre das Verfahren zusätzlich auch objektivierbar.



Zoom-Endoskope in Verbindung mit Färbetechniken erleichtern die Diagnosen (hier ein Darm-Polyp, links: konventionelles Endoskop, Mitte: Anfärbung mit Indigokarmin, rechts: 100fache Vergrößerung).



Zur optischen Biopsie eignet sich ein Kontrastmittel, das fluoresziert, wenn es mit tumorspezifischen Enzymen Kontakt hatte.

Unseres Erachtens könnte in einigen Jahren ein Multisensor-Endoskop zur Verfügung stehen, das verschiedene bildgebende Verfahren in sich vereint. Der Einsatzbereich eines solchen Gerätekonzepts umfasst nahezu alle klinischen Disziplinen und dürfte die Früherkennung von Tumoren und dadurch auch die Behandlungsmöglichkeiten von Krebs im Allgemeinen maßgeblich verbessern. ■

Frank König *lehrt Endoskopie an der urologischen Abteilung der Charité.*

Literaturhinweise

Handbook of Optical Coherence Tomography. Von G. J. Tearney und B. E. Bouma. Marcel Dekker Inc., 2001.

Diagnosing cancer in vivo. Von F. Koenig et al. in: Science, Heft 292, S. 1401, 2001.

DIAGNOSTIK II

Licht ertastet Organe

Von Erfolgsrezepten soll man lernen: Was mit Ultraschall im Großen geht, soll infrarotes Licht im Kleinen leisten. Gewebe enthüllen ihre Struktur, und das sogar via Endoskop.

Von Eva Lankenau

Wer zum Ultraschall geht, erfährt Neues aus seinem Körper, ohne sich Röntgenstrahlen oder der Enge eines Kernspintomografen aussetzen zu müssen. Ein so genannter Schallkopf sendet dazu hochfrequente Wellen aus, die durch den Körper wandern und an Grenzflächen verschiedener Gewebe reflektiert werden, weil sich deren akustische Eigenschaften unterscheiden. Das Resultat ist ein Schwarzweißbild der inneren Strukturen des Körpers. Die optische Kohärenztomografie (OCT) arbeitet im Grunde nach dem gleichen Prinzip, nutzt aber infrarotes Licht einer speziellen Halbleiterdiode.

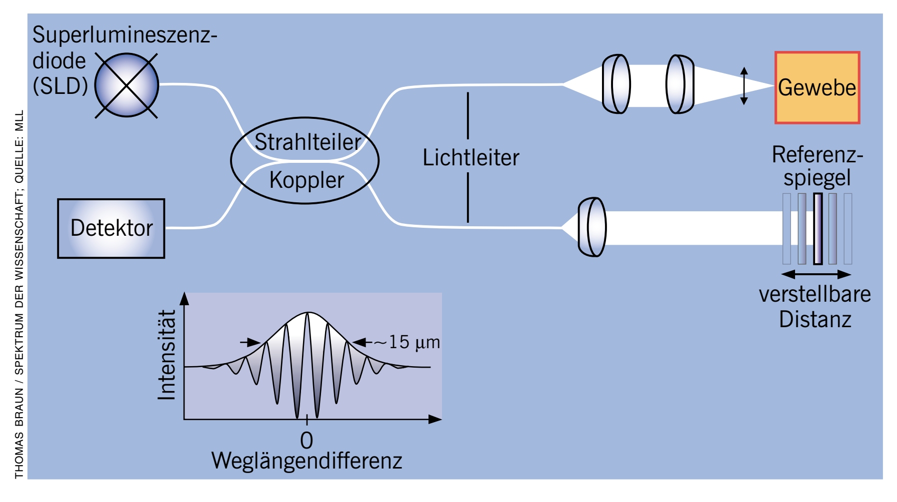
Ein solches Gerät haben wir seit 1994 bis zur Prototypreife entwickelt. Es bestimmt den Abstand zu Gewebegrenzflächen dank der Welleneigenschaft von Licht: Spaltet man einen Lichtstrahl, schickt die „Hälften“ auf zwei getrennte Wege und führt sie dann wieder zusammen, entsteht entlang des gemeinsamen Weges das bekannte Streifenmuster der Interferenz, also wechselnde Bereiche hoher und abgeschwächter Lichtintensität. Unterscheiden sich die getrennt zurückgelegten Strecken aber um mehr als die so genannte Kohärenzlänge, bleibt das Streifenmuster aus, die Helligkeiten addieren sich einfach. Dieses Phänomen eignet sich trefflich, um einen Abstand auszumessen: Ein Strahl reist entlang der unbekannten Strecke, der andere auf einer verstellbaren Referenz. Sobald Interferenz auftritt, ist der Wert bis auf die Kohärenzlänge genau bekannt.

Je breiter das Spektrum einer Lichtquelle, desto kleiner ist diese Länge. Ein Laser, der im Idealfall nur eine einzelne Wellenlänge aussendet, erlaubt deshalb einige Meter Wegdifferenz – zu viel für unsere Zwecke. Wir verwenden vielmehr spezielle Halbleiterdioden (Superlumineszenzdioden, SLD), die im nahen Infrarot leuchten, wobei die Zentralwellenlänge bei 1300 Nanometern liegt und die spektrale Breite 45 Nanometer (millionstel Millimeter) beträgt. Bei diesen Wellenlängen wird Licht in biologischen Geweben weniger stark gestreut und absorbiert als bei anderen, dringt also tiefer ein. Die Kohärenzlänge schrumpft auf nur noch 15 Mikrometer und gibt damit die Auflösung eines OCT-Bildes vor.

Das System vergleicht die Lichtwege von der Diode zu einem Referenzspiegel einerseits und zu einer Gewebegrenzfläche andererseits (siehe Grafik). Der erste Weg wird automatisch verstellt, bis Interferenz auftritt. Dann kann man ihn weiter verfahren, um schließlich alle Strukturen in der Tiefe zu erfassen.

Das Messprinzip liefert aber nicht nur geometrische Informationen, sondern zeigt auch unterschiedliche optische Eigenschaften der Gewebe. Die Helligkeit in den Streifen ist nämlich umso größer, je mehr Licht jeweils zurück gestreut wurde. Diese Amplitude ist es schließlich, die bei einem Tiefenscan, dem so genannten A-Bild, auf dem Monitor dargestellt wird.

Bislang wurde diese neue Technik in der Haut- und in der Augenheilkunde erfolgreich eingesetzt. Das Licht koppelt man in Quarzglas-Lichtwellenleiter ein. Die können mehrere Meter lang sein und verzeihen auch Ecken und Kanten. Das mittlerweile von der Lübecker Firma 4optics, einem Spin-off-Unternehmen des dortigen Laserzentrums, zum Pro-



THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; QUELLE: MLL

Das Licht einer speziellen Diode (SLD) wird in der optischen Kohärenztomografie auf zwei Wege geschickt. Der eine, zu vermessende, führt zum Gewebe, der andere, verstellbare, zu einem Referenzspiegel. Das reflektierte Licht gelangt über einen Koppler zum Detektor, einer Fotodiode. Stimmen die Wege überein, misst diese ein Interferenzmuster aus hellen und dunklen Streifen. Auf diese Weise enthüllte das Verfahren den mehrschichtigen Aufbau der Blasenwand eines Patienten (unten links): obere Zellschicht (Urothel), Verbindungsschicht (Lamina propria) und Muskelmantel. Das Verfahren hält dem Vergleich mit dem Gewebeschnitt nach herkömmlicher Probenentnahme (unten rechts) durchaus stand.

MLL

MLL

dukt entwickelte System erreicht eine hohe Messgeschwindigkeit, sodass zwei Millimeter Gewebetiefe – ein typischer Wert in der Haut – in einer hundertstel Sekunde abgetastet werden. Dazu variiert das Gerät den optischen Weg des Referenzstrahls nicht durch Verstellen von Spiegeln, sonderen durch Dehnen des elastischen Lichtwellenleiters. Etwa 200 Tiefenscans ergeben ein zweidimensionales Schnittbild, das B-Bild. Ein komplettes Bild aufzunehmen dauert bei Hautmessungen etwa zwei Sekunden, kurz genug, um Störungen durch Bewegung des Patienten weitgehend zu vermeiden.

Ein weiteres Anwendungsfeld erschließt unser Zentrum derzeit gemeinsam mit der Firma Richard Wolf – die endoskopische OCT für urologischeUntersuchungen. Um beispielsweise die Infiltrationstiefe und Lage von Tumoren der Harnblase zu untersuchen, wird die zur Probe führende Glasfaser über einen OCT-Adapter mit einem starren, bildgebenden Endoskop kombiniert; das OCT-Basisgerät stammt von 4optics. Eine Kamera mit einem speziellen Adapter zeigt dem Arzt parallel zu dem ihm geläufigen Bild der Blasenwand online die OCT-Darstellung der oberen Gewebeschichten und der tiefer liegenden Strukturen.

Bislang haben sich fünf Patienten an der Charité für die klinische Prüfung zur Verfügung gestellt (siehe den vorigen Beitrag), bis zu siebzig sollen es innerhalb der nächsten zwei Jahre insgesamt sein. Dann werden wir wissen, inwieweit sich dieses endoskopische Verfahren auch für andere diagnostische Fragestellungen eignet. ■

Eva Lankenau *promoviert zum Thema am Medizinischen Laserzentrum Lübeck.*

HIRNCHIRURGIE

Tief im Schädel

Einen Tumor im Innern des Gehirns zu operieren, hatte früher oft schwere neurologische Störungen bis hin zu Lähmungen zur Folge. Endoskope verletzen weniger Gewebe, doch die Orientierung in der grauen Masse fällt schwer.

Von Michael R. Gaab

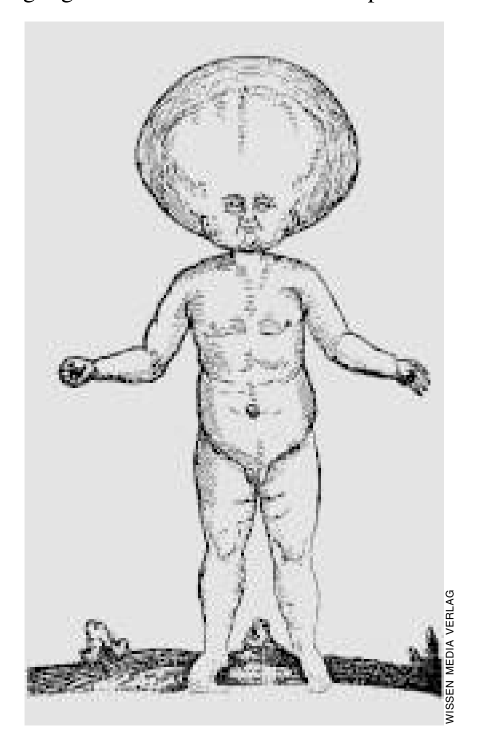
Das Gehirn, so formulierte der Sachbuchautor Jürgen Thorwald 1986, ist das „zerbrechliche Haus der Seele.“ Manche Forscher sehen darin prosaischer eine komplexe Schaltzentrale für sämtliche vitalen Funktionen bis hin zum Bewusstsein. Liegt in der Tiefe dieses Gebildes ein Tumor, eine Zyste oder sonst ein krankhafter Prozess, muss der Chirurg oft darin eindringen, auch wenn er dabei Schaden anrichtet: Der kompakte Hirnmantel und alles im Weg zum Zielort liegende Nervengewebe wird gespalten, um das Operationsgebiet freizulegen. Erkrankungen in den tiefer im Hirn liegenden Hirnkammern oder im Hirnstamm, der elementare Körperfunktionen steuert, erfordern oft mehr als fünf Zentimeter tiefe Schnitte und ein Auseinanderdrücken des gespaltenen Hirns mit Spateln. Als Folge können wichtige Hirnfunktionen ausfallen, sodass die Patienten fortan unter Lähmungen, Sprach- oder Sehstörungen oder epileptischen Anfällen leiden; manche kommen gar nicht mehr zu Bewusstsein.

Weniger riskant sind Eingriffe in Tiefen unter zwei Zentimetern, mitunter bieten auch schon vorhandene Spalträume wie die große mittlere Hirnfurche einen Zugang. In diesen Fällen operiert der Mikrochirurg Tumoren, Hirngefäßmissbildungen, Entzündungsherde und Blutungen unter einem Operationsmikroskop, das Gewebe etwa 8- bis 10fach vergrößert zeigt und so feinstes Arbeiten ermöglicht; zudem lenkt das Gerät über seine Optik auch Licht in das Operationsgebiet. Im Zentrum des Gehirns, etwa in den flüssigkeitsgefüllten Hirnkammern, erweist sich dieses Hilfsmittel als weniger hilfreich, denn nur ein Bruchteil der Beleuchtung erreicht den Krankheitsprozess, und der Tiefenschärfebereich ist so schmal, dass der Chirurg ständig nachfokussieren muss.

Hier bietet die endoskopische Operationstechnik große Vorteile: Sie verlagert das Auge des Arztes in die Tiefe – bei optimaler technischer Ausstattung sieht er den Krankheitsherd vor der Spitze des Endoskops, und zwar scharf von zwei Millimeter bis mehrere Zentimeter Abstand und das in einem Gesichtsfeld von mehr als 140 Grad. Nach den ersten Anwendungen in der Urologie bei Erkrankungen von Harnblase oder Harnleiter erprobten amerikanische Ärzte deshalb bereits Anfang des 20. Jahrhunderts Endoskope zur Behandlung des damals weit verbreiteten Wasserkopfes. Doch die Komplikationen überwogen die Vorteile, eine Folge nicht nur ungenügender optischer Qualität und mangelhafter Beleuchtung: Der Chirurg musste das Zielgewebe mit dem bloßen Auge beobachten, das Instrument bot keinen ausreichenden Schutz gegen Infektionen.

Den entscheidenden Durchbruch in der Neurochirurgie Anfang der 1990er Jahre verdankt dieses Verfahren deshalb vor allem der Videotechnik; hinzu kommt die verbesserte Optik und Beleuchtung sowie die Computersteuerung von Instrumenten. Seitdem erscheint das Operationsgebiet auf einem Monitor, der Chirurg manipuliert sein Endoskop sowie dadurch eingeführte Instrumente mit sterilen Handschuhen oder sogar nur indirekt über einen Roboter. Die Infektionsgefahr ist damit ebenso gering wie bei der Arbeit mit dem Mikroskop.

Manche Bandscheiben und Verengungen der Handnerven beim Karpaltun- ▶



WISSEN MEDIA VERLAG

Das „Nürnberger Flugblatt“ von 1556 zeigt einen Wasserkopf-Patienten als monströse Erscheinung. Auch heute ist es nicht leicht, diesen Menschen zu helfen.

nelsyndrom lassen sich auf diese Weise behandeln, aber auch Krankheitsherde im gesamten Schädelinnenraum und an dessen Basis. Im letzteren Fall kann das Endoskop manchmal sogar von unten durch die Nase an die Schädelbasis oder in den Schädel geführt werden.

Viele Tumoren der dort gelegenen Hirnanhangdrüse (Hypophyse) und einige krankhafte Knochenveränderungen der Basis können so behandelt werden, ohne das Gehirn zu verletzen oder auch nur zu berühren. Hingegen ist der „intrakranielle" Raum nur über ein wenige Millimeter großes Bohrloch zugänglich. Dabei durchdringt das Endoskop die verschiedenen Hirnhäute, den von ihnen umschlossenen, mit Hirnflüssigkeit gefüllten Zwischenraum und den Hirnmantel. Eines der Hauptprobleme dieser Endoskopie ist deshalb die Blutstillung – Blut, das sich in der Hirnflüssigkeit verteilt, erschwert die Sicht.

Die schwierigste Aufgabe aber ist die Navigation des Geräts im Schädelinnern. Es fehlen deutlich unterscheidbare Orientierungsmarken wie etwa Knochenstrukturen. Einen Lösungsansatz bot zunächst die Stereotaxie. Bei diesem zum Beispiel für die Entnahme von Gewebeproben aus Hirntumoren entwickelten Verfahren wird ein Rahmen am Schädel des Patienten befestigt. Die Schrauben zeichnen sich im Computertomogramm ab, sodass sich ein eindeutiger Bezug zwischen dem Koordinatensystem des Röntgengeräts und den Achsen des Rahmens ergibt. Anhand dieser Transformation planen wir im Tomogramm den Eingriff und schieben dann das am Rahmen befestigte Endoskop im richtigen Winkel millimetergenau ans Ziel.

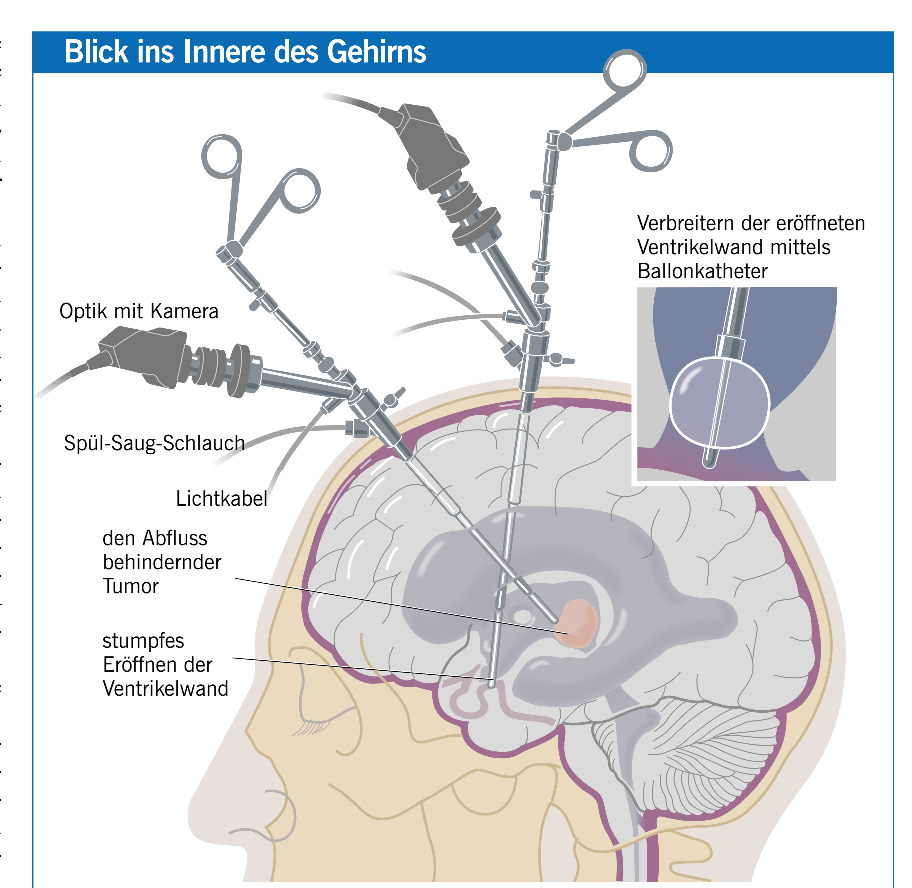
Im Blindflug durch den Schädel

Da der Rahmen das Endoskop zwar führt, aber gleichzeitig auch in seiner Manövrierbarkeit vor dem Krankheitsprozess behindert, verwenden wir heute vor allem die so genannte Neuronavigation: Bei diesem Verfahren werden Position und Richtung des Endoskops im Raum ständig durch Infrarotmarker geortet. Die Planung des Eingriffs erfolgt virtuell anhand der Daten des Kernspin- oder Computertomografen. Auf einem Bildschirm lässt sich dann der geplante und der reale, gemessene Weg des Geräts steuern, sei es von Hand, sei es von einem Roboter. Der Chirurg ähnelt dabei einem Piloten, der trotz dichter Wolkendecke im Blindflug sicher die Landebahn erreicht.

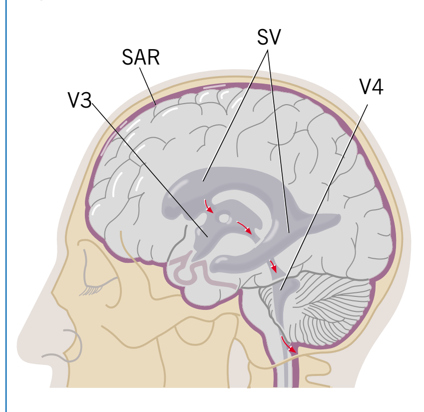
Um möglichst wenig Schaden im gesunden Hirngewebe anzurichten, verwenden wir starre Endoskope mit Durchmessern von weniger als vier Millimetern, die Lichtzuführung ist darin bereits eingeschlossen.

Es gibt Systeme, die das Licht über Glasstäbe leiten; zwischen diesen liegen Hohlräume, die als Linsen aus Luft fungieren. Der Vorteil dieser so genannten Hopkins-Optik im Vergleich zum herkömmlichen Lichtweg aus Luft mit Glaslinsen sind die höhere Lichtstärke und der größere Blickwinkel von mehr als 140 Grad. Andere Geräte schauen nicht geradeaus, sondern in einem Winkel von 30 oder 70 Grad zur Seite. Einige Endoskope können sogar 120 Grad ums Eck, also hinter das Endoskop blicken. Derartige Geräte mit abgewinkelter Blickrichtung führen das Licht meist über zusätzliche Glasfasern; dann bieten sich auch Xenon-Kaltlichtquellen zur Beleuchtung an; sie erreichen Sonnenlichtqualität. Die Fasern nehmen aber ei-

Blick ins Innere des Gehirns



Ein Verschluss des Hirnwasserablaufs kann angeboren sein, eine Folge von Komplikationen bei der Geburt, oder durch Entzündungen, Narben, Tumoren oder Blutgerinnsel verursacht. Nach Möglichkeit sucht der Chirurg die Ursache zu entfernen. Sofern das nicht möglich ist, legt er einen Bypass vom 3. Ventrikel in den Subarachnoidalraum. Dazu führt er die abgewinkelte Optik über einen Operationsschaft ein. Ein gerader Instrumentenkanal nimmt Zangen, Scheren oder einen Ballonkatheter auf.



Der Verschlusswasserkopf entsteht, wenn Hirnwasser, das als Flüssigkeitspolster dient, nicht mehr aus den Hirnkammern (Ventrikel, blau) abfließen kann. Normalerweise gelangt es vom Seitenventrikel (SV) über den 3. und 4. Ventrikel (V3 und V4) in den so genannten Subarachnoidalraum (SAR), wo es dann in die großen Hirnsinus (abführende Venenblutleiter) aufgenommen wird.

REINHOLD HENKEL; QUELLE: GAAB

nigen Platz weg, sodass eine punktförmige Lichtführung über zwei kleine Glasstäbe vor allem dann verwendet wird, wenn auch Instrumente durch das Endoskoprohr zwischen den Glasstäben geschoben werden müssen.

Hirnwasser auf neuen Wegen

Je nach Anwendung können das dünne Kanülen von zwei Millimetern Durchmesser sein, die Hirnwasser ableiten, oder bis zu drei Millimeter starke Zangen, Scheren, Koagulationsinstrumente und Führungen für Laserfasern, um Tumoren bis zwei Zentimeter Durchmesser zu zerstören. Das technische Repertoire ergänzen weniger als drei Millimeter dünne Endoskope mit Glasfaser-Bildübertragung. Zwar bringen sie geringere Auflösung, kleinere Blickwinkel und schwächere Beleuchtung, doch sie sind biegsam und lassen sich somit um Kurven durch enge Kanäle in Hirn und Rückenmark führen. Oft werden diese flexiblen Endoskope zunächst durch ein starres Endoskop geführt, um ihre Bewegung zu kontrollieren und Hirngewebe vor Verletzung zu schützen. Die Bildgebung erfolgt dabei über zwei kleine hochauflösende, an beiden Geräten befestigte Videokameras mit Darstellung auf einem geteilten Monitor.

Das Endoskop kann aber auch dazu benutzt werden, um bei der Operation mit dem Mikroskop zusätzlich in die Tiefe oder ums Eck zu schauen (endoskopisch assistierte Mikrochirurgie). Eine Elektronik spiegelt das Bild in das Okular des Mikroskops ein.

Immer dann, wenn ein Krankheitsprozess in der Tiefe des Gehirns nicht mehr als zwei bis drei Zentimeter misst und nicht zu stark durchblutet ist, steht die Endoskopie in Konkurrenz zur bisherigen Mikro-Neurochirurgie. Kommt der Arzt mit einem Operationsgebiet aus, das sich auf das Innere eines in der Praxis etwa sechs bis acht Millimeter starken Rohres beschränkt, durch das er dann dünnere Geräte und Instrumente einbringt, und verletzt dieses Führungsrohr funktionell wichtige Hirnregionen weniger als die mikrochirurgische Spaltung, ist die Endoskopie das Mittel der Wahl.

Deshalb ist sie bereits Standard bei der Behandlung des so genannten Verschluss-Hydrozephalus. Diese Form des Wasserkopfes entsteht dann, wenn das Hirnwasser nicht gut abfließen kann, weil ihm irgendwo in den Hirnkammern oder am Austritt daraus ein Hindernis den Weg versperrt, etwa eine Narbe oder ein Tumor. Dann kann man mit dem Endoskop einen Umgehungskreislauf anlegen. Häufig befindet sich das Hindernis zwischen der 3. und 4. Hirnkammer im „Aquädukt". Dann öffnet der Chirurg am Boden des 3. Ventrikels endoskopisch ein Loch nach außen.

Auf gleiche Weise lassen sich andere flüssigkeitsgefüllte, krankhafte Prozesse im Hirn wie zystische Tumoren oder Fehlbildungen sowie Druck ausübende Zysten an der Hirnoberfläche durch Anschluss an den Hirnwasserkreislauf beseitigen. Ist aber die Aufnahme des Liquors an der Hirnoberfläche in die Hirnblutleiter gestört (*Hydrocephalus malresorptivus*), dann lässt sich das Problem nicht endoskopisch lösen. Stattdessen wird ein Katheter in die Hirnkammer eingelegt – eventuell besonders präzise mit dem Endoskop – und der Liquor über einen Schlauch mit Ventil beispielsweise zum Bauchraum ableitet. Das ist allerdings nicht der Weisheit letzter Schluss, denn dieser Eingriff hat häufig Komplikationen zur Folge.

Meine Zunft setzt große Hoffnungen in die Endoskopie: Verbesserte Instrumente wie das Wasserstrahlskalpell werden uns helfen, krankes Gewebe schonender zu entfernen, vor allem aber hoffen wir auf effektivere Methoden zur Blutstillung, verfeinerte Formen der Computersteuerung und neue Methoden, um künstliche Hohlräume zu schaffen. Allerdings ist das Endoskop kein Zauberstab, der in der Hand des Uneingeweihten Wunder vollbrächte. Im Gegenteil: Unachtsames Präparieren in der Tiefe des Gehirns kann Gefäße verletzen und sogar den Patienten töten. Die endoskopische Hirnchirurgie erfordert daher ein intensives Training – auch mittels computergestützter Simulationen – und sollte nur von sehr erfahrenen Mikrochirurgen angewandt werden. ■

Michael R. Gaab *lehrt und operiert an der Neurochirurgischen Universitätsklinik und Poliklinik der Ernst-Moritz-Arndt-Universität in Greifswald. Zu seinen Forschungsschwerpunkten zählen die mikrochirurgische Tumorbehandlung mit Computerunterstützung und die Endoskopische Neurochirurgie. Weil endoskopisch behandelbare Hirnerkrankungen in Entwicklungsländern häufig vorkommen, engagiert er sich auch für die Endoskopie in Südafrika.*

Literaturhinweis

Im zerbrechlichen Haus der Seele. Die große Odyssee der Gehirnchirurgie. Von Jürgen Thorwald. Droemer-Knaur, München 1986.

BAUCHSPIEGELUNG

Den Tunnelblick erweitern

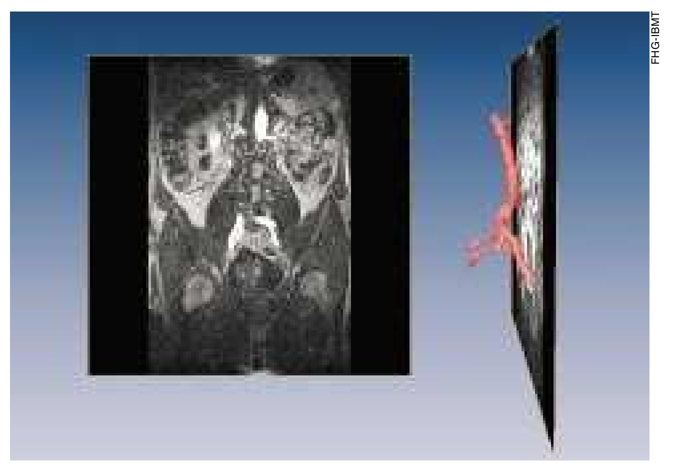
Zusatzinformationen im Monitorbild simulieren ein klassisches, also offenes Operationsfeld.

Von Peter Karl Weber

So groß der Segen der Schlüsselloch-chirurgie für den Patienten auch ist, die Arbeit des Arztes erleichtert sie nicht. Das gilt auch für die Anfang der 1990er Jahre etablierte Laparoskopie, also die minimalinvasive Bauchoperation. Denn der Chirurg erfasst nicht mehr das ganze Operationsfeld, sondern nur noch einen kreisförmigen, flächig wirkenden Ausschnitt. Zudem fehlt ihm nun die Möglichkeit, unter Geweben verborgene Strukturen zu ertasten, sei es, um sich zu orientieren, sei es, um sie nicht zu verletzen. Muss der Arzt beispielsweise einen Teil des Dickdarms herausschneiden, der im linken Unterbauch unmittelbar beim Harnleiter verläuft, bleibt ihm nun nur eines übrig: Im engen Blickfeld der Endoskopkamera präpariert er das beide Organe koppelnde Bindegewebe sukzessive heraus, bis er es lösen kann.

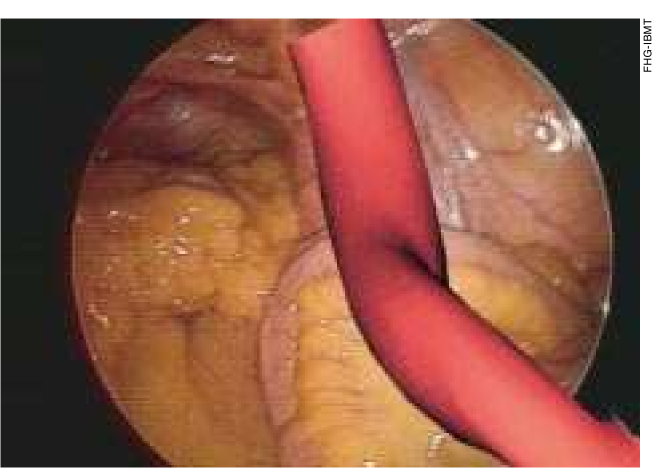
Vom Zeitaufwand abgesehen, ruft diese Bildschirmarbeit mitunter sogar Desorientierung, Schwindelgefühle und Übelkeit hervor. Die menschliche Feinmotorik wird nämlich im Wesentlichen über den Lage- und Orientierungssinn des Innenohres und über den Gesichtssinn gesteuert. Die Augen schauen dazu meist in die Richtung, in die Hände und Finger bewegt werden sollen. Das Ziel wird dreidimensional erfasst, eine Bewegung gestartet und unter Sichtkontakt korrigiert. Ein Endoskop bietet aber nur selten eine räumliche Darstellung und entkoppelt die Augen vom Gleichgewichtsorgan. Die Kamera dreht sich, ohne dass der Chirurg den Kopf bewegt hat. Das optische Feedback wird gestört.

Ein jüngerer Zweig der Computergrafik könnte Abhilfe schaffen, nämlich ▶



FHG-IBMT

Aus Schnittbildern, mit dem Magnetresonanz-Tomografen aufgenommen, rekonstruiert ein Programm die Aorta und die in die Beine abzweigenden Arterien.



FHG-IBMT

So soll es einmal aussehen: Im Bild der Endoskopkamera erscheint der im sichtbaren Bereich verlaufende Abschnitt der Hauptarterie des linken Beines.

einerseits die *virtual reality*, die es trefflich versteht, räumlich wirkende Ansichten zu generieren, andererseits die *augmented reality*, zu Deutsch etwa „verstärkte Wirklichkeit“, die das Gesehene um Zusatzinformationen anreichert. Ein Ingenieur soll zum Beispiel bei der Begutachtung eines Geräts dessen Konstruktionszeichnungen in eine Spezialbrille einspiegeln können, ein Tourist Angaben zur Geschichte des betrachteten Gebäudes.

Soll der Bauchchirurg sein Operationsfeld räumlich sehen, erfordert das zunächst einmal ein Stereoendoskop. Wie unsere beiden Augen nimmt es zwei Teilbilder auf, sei es, indem sie eine Monokamera mechanisch hin- und herschalten, oder mittels einer Stereokamera. Solche Geräte gibt es seit dem Ende der 1980er Jahre, doch sind sie sozusagen nur die halbe Miete. Um dem Chirurgen den räumlichen Eindruck zu vermitteln, müssen die beiden Teilbilder seinem linken beziehungsweise rechten Auge getrennt dargeboten werden und zwar ohne Flimmern, also mit jeweils mindestens fünfzig Bildern pro Sekunde.

Eine Möglichkeit ist, die beiden Teilbilder im zeitlichen Wechsel auf einen Schirm zu projizieren. Die Bildwiederholrate beträgt dann dementsprechend mindestens hundert Hertz, das leisten zurzeit nur herkömmliche Kathodenstrahlmonitore. Zur Trennung von rechtem und linkem Teilbild muss der Chirurg zudem eine Spezialbrille tragen, die entweder synchronisiert mit dem Bildschirm die Augen im Wechsel verdeckt (Shutterbrille), oder deren Gläser unterschiedliche Polarisationsfilter tragen – die Wellen der Teilbilder sind dann entsprechend ausgerichtet. Eine Alternative wäre der bei Computerspielen so beliebte Datenhelm mit jeweils einem Mini-

Dünndarmspiegelung

Eine Kapsel geht auf Reisen

GIVEN IMAGING GMBH, HAMBURG

Bei Magenbeschwerden schluckt man – mühevoll – einen Schlauch, beim Verdacht auf Darmkrebs wird ein Koloskop in den Dickdarm geschoben. Seit vielen Jahren kann sich der Arzt über Kamerasysteme ein Bild dieser Organe machen. Durch den drei bis fünf Meter langen und gewundenen Dünndarm, zwischen Magen und Dickdarm gelegen, lässt sich aber kein Endoskop schieben. Bislang blieb hier nur das Röntgen – nach Kontrastmittelgabe stellen sich Wand und Schleimhaut indirekt dar. Diese Situation ist unbefriedigend, etwa bei Magenblutungen, deren Quelle nach endoskopischer Untersuchung weder im Magen noch im Dickdarm liegt.

Doch vor etwa fünf Jahren gelang es dem Ingenieur Gavriel Iddan und seinen Mitarbeitern vom israelischen Verteidigungsministerium, eine Kapsel zu entwickeln, die eine winzige Videokamera durch den Dünndarm zu transportieren vermag. Seit Herbst letzten Jahres ist sie in Deutschland zugelassen und wird derzeit unter anderem am Universitätsklinikum Mannheim getestet.

Die Kapsel hat etwa die Größe einer Tablette, lässt sich also gut schlucken. Die natürliche Darmperistaltik befördert sie durch ihr Einsatzgebiet. Ein Ende ist durchsichtig, und dahinter sitzt zusammen mit vier Blitzlichtern die Videokamera. In welche Richtung sie blickt, lässt sich freilich nicht beeinflussen, doch der Blickwinkel beträgt etwa 140 Grad. Zwei Batterien versorgen die Anlage mit ausreichend Strom, um sieben Stunden lang jeweils zwei ausgeleuchtete Bilder pro Sekunde aufzunehmen, zu kodieren und über eine Antenne mit 430 Megahertz zu versenden. Als Empfänger dienen Sensorfelder, die auf den Bauch des Patienten geklebt werden. Während der Untersuchung trägt der Patient einen Gürtel mit Batterien und einem Aufzeichnungsgerät.

Das Verfahren verursacht keinerlei Schmerzen und lässt sich auch ambulant durchführen. Lediglich die Stadtverwaltung könnte Beschwerde einlegen, denn die kleine Kapsel wird nur einmal verwendet und mit dem Stuhl ausgeschieden. Am Ende werden etwa 50 000 Bilder mit einer Auflösung von 0,1 Millimeter auf einen Computer übertragen und zu einem Film verarbeitet. Nach etwa 15 Minuten steht die Innenansicht des Dünndarms schließlich dem Arzt zur Verfügung.

Phillip Knebel und Frank Hummel

Phillip Knebel promoviert an der II. Medizinischen Universitätsklinik Mannheim. Frank Hummel ist der zuständige Assistenzarzt.

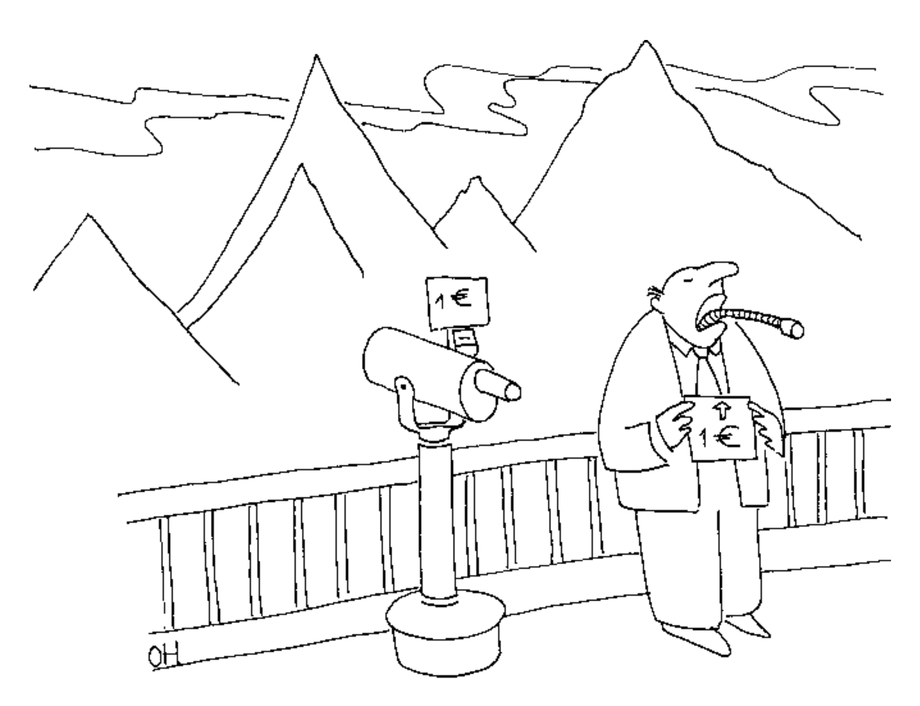
Monitor direkt vor jedem Auge. Diese Ausrüstung gilt Chirurgen aber meist als unergonomisch, außerdem verhindern sie den Blickkontakt zu Instrumenten, Assistenten und OP-Schwestern.

Wir bevorzugen eine dritte Technik. Autostereodisplays verwenden einen herkömmlichen Flachbildschirm und erfordern keine zusätzliche Brille. Das von uns benutzte System verschachtelt beide Teilbilder spaltenweise ineinander (*interlaced*). Vor das Display wird eine Maske aus speziell geformten Stablinsen angebracht, deren Breite genau dieser Spaltenbreite entspricht. Sie lenken die beiden Teilbilder auf das rechte beziehungsweise linke Auge. Das Verfahren hat derzeit aber noch seine Nachteile. Dazu gehören neben einem maximalen Betrachtungsabstand von sechzig bis achtzig Zentimetern vor allem auch die geringe Auflösung und Verzeichnungen. Allerdings sollen deutlich bessere Modelle bald auf den Markt kommen – es gibt Techniken, diese Fehler zu vermeiden; sie erhöhen jedoch die Kosten. Die allgemeine Beliebtheit von Flachbildschirmen in der Medizintechnik dürfte die Verbreitung begünstigen.

Um die für die Feinmotorik so wichtige Sichtachse zwischen den Augen und dem realen Ort des Operierens aufrechtzuerhalten, entwickeln Wissenschaftler am Fraunhofer Institut für Graphische Datenverarbeitung in Darmstadt zudem ein Display, das die räumliche Beziehung zwischen der Blickrichtung des Chirurgen und der Endoskopkamera beachtet.

Informationen zu verdeckten Organteilen und Gewebestrukturen erweisen sich während der Operation als sehr nützlich, etwa um den Harnleiter zu umgehen. Solche Daten liegen auch vor, sie wurden mittels Ultraschall, Computer- oder Magnetresonanz-Tomografie aufgenommen. Sie in das Endoskopbild einzublenden, wäre wünschenswert, ist aber in der Bauchchirurgie nur schwer zu bewerkstelligen. Betrachtet ein Ingenieur eine Maschine über eine Augmented-Reality-Brille mit Kamera, kann der Computer die Strukturen im Videobild identifizieren und eindeutig den hinterlegten Konstruktionszeichnungen zuordnen.

Der Schlüsselloch-Blick in den Bauchraum liefert aber kaum eindeutige Orientierungshilfen, es gibt ja nicht einmal Knochenstrukturen. Darüber hinaus verändert sich die Form des Gewebes während der Operation massiv, allein schon durch eine andere Lagerung des Patienten als bei den Aufnahmen, erst recht durch den Eingriff. Obwohl viele Kliniken Röntgen-, Computer- oder Kernspintomografiebilder bereits digital aufzeichnen und verarbeiten, hängen die Ärzte meist herkömmliche Schwarzweißfilme an einen Schaukasten außerhalb des sterilen Bereichs. Allein die Entfernung zum Operationstisch mindert den Nutzen – wer hat schon Adleraugen?



Landmarke große Bauchschlagader

Auch wenn es zunächst nahezu unmöglich scheint: Wir arbeiten daran, aus Bilddaten der Tomografen dreidimensionale Modelle beliebiger anatomischer Strukturen zu rekonstruieren, sie im Bild einer Endoskopkamera wiederzufinden und dann beide in korrekter Zuordnung darzustellen. Zum Glück gibt es auch im Bauchraum einige – allerdings nur wenige – Bezugspunkte, die sich sowohl auf Kernspinaufnahmen als auch auf den Kamerabildern an der gleichen Stelle im Bauchraum abzeichnen und eine gewisse Formstabilität besitzen. Dazu gehört die große Bauchschlagader (Aorta), die an der hinteren Bauchwand vor der Wirbelsäule fixiert ist, und mit Einschränkungen auch der Harnleiter, der unabhängig von der Lagerung des Patienten in einer festen Position und Richtung zur Aorta im Bindegewebe verläuft.

Von einer womöglich vollautomatischen Verarbeitung der beiden Bildquellen und Referenzierung sind wir allerdings noch weit entfernt. Ungünstige Lichtverhältnisse und spiegelnde Reflektionen im Operationsgebiet stören alle bekannten Algorithmen, die Form und Position von dreidimensionalen Strukturen in stereoskopischen Bildern berechnen. Hinzu kommt, dass der Chirurg bei seinem Eingriff Gewebe manipuliert. So werden bei der Teilresektion des Dickdarms mit dem Lösen der Darmwand vom Bindegewebe dieses selbst und damit auch die in ihm liegenden Strukturen verformt. Die Aorta ist davon weniger betroffen, wohl aber der Harnleiter. Techniken zur Simulation solcher Deformationen gibt es bereits, für den Einsatz im OP sind sie aber noch nicht geeignet.



Der Ingenieur **Peter Karl Weber** *leitet die Abteilung „Computerunterstützte Simulationen" des Fraunhofer Instituts für Biomedizinische Technik bei Saarbrücken.*

Literaturhinweise

3-Dimensional Visualization during Laparoscopic Abdominal Surgery with Dresden 3D's Display D4D. Von Andreas Limberger in: Proceedings of the 2002 Conference ‚Medicine Meets Virtual Reality', Newport Beach, 2002.

The effect of a second-generation 3D endoscope on the laparoscopic precision of novices and experienced surgeons. Von Nick Taffinder et al. in: Surgical Endoscopy, Bd. 13, Ausgabe 11, S. 1087, 1999.

Energietechnik: EnOcean GmbH

Strom zum Nulltarif

Ein Griff zum Schalter – knips! – und das Licht geht an. Das verwundert heutzutage allenfalls Kleinkinder. Wenn jedoch ein Funkmodul der Firma En Ocean beteiligt ist, dann verdient die Angelegenheit schon eine genauere Betrachtung. Das Unternehmen entwickelt nämlich Techniken, um Steuerbefehle oder Daten ohne Stromanschluss oder Batterie bis zu 300 Meter weit zu funken. Dazu genügen den Systemen bereits winzige Energiemengen von rund fünfzig Mikrojoule; ein Druck auf die Taste von Keyboard oder Handy benötigt ein Vielfaches davon.

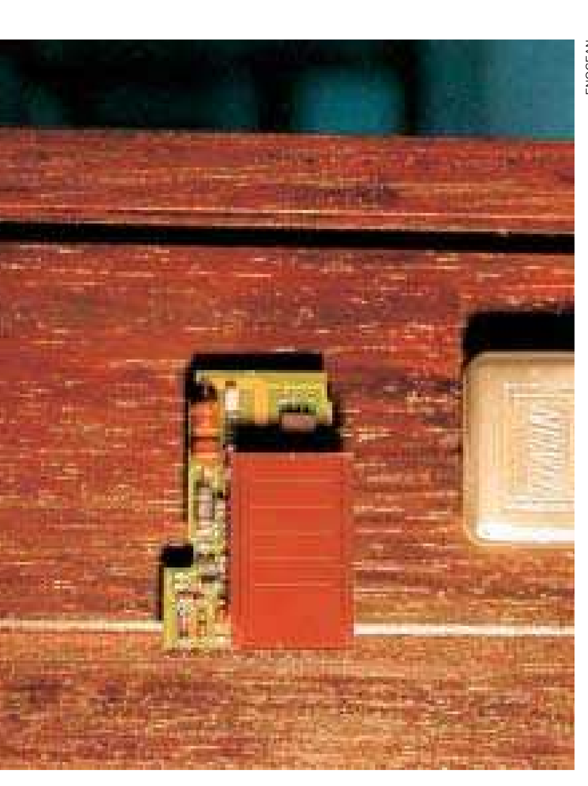
Dass daraus eine elektrische Spannung wird, dafür sorgen piezoelektrische Kristalle. Durch den mechanischen Druck verändern sie ihre Form, und die Ladungen der Kristallgitter verschieben sich gegeneinander. Schalter mit solchen Piezo-Funkmodulen lassen sich unter dem Putz installieren oder auf Wände, Spiegel und Fenster kleben. Bis zu vier Schaltfunktionen wie „Licht ein/aus" oder „Jalousie herunter/herauf" kann ein Modul einem im Lampensockel oder unter Putz liegenden Empfänger weiterfunken, der die gewünschte Aktion veranlasst.

Damit es bei der Steuerung mehrerer Verbraucher keine Verwirrung gibt, schickt jeder Schalter seine persönliche Identifikationsnummer als 32-Bit-Adresse. Damit ließen sich mehr als vier Milliarden Sender voneinander unterscheiden. Da die Telegramme innerhalb weniger Millisekunden mehrmals und vor allem gegeneinander zeitversetzt ausgesendet werden, kann ein Empfänger auch dann noch das für ihn bestimmte Signal erkennen, wenn in seinem Empfangsradius bis zu hundert Funkmodule gleichzeitig arbeiten. Die kurze Sendezeit hat noch einen weiteren Vorteil: Bei einer tausendstel Sekunde pro Vorgang und einer Leistung von jeweils zehn Milliwatt senden die Module etwa eine Millionen Mal weniger Energie als schnurlose Telefone und Handys.

Da die sonst üblichen Verkabelungen wegfallen, lassen sich die wartungsfreien Schalter beliebig platzieren. Allein davon erhofft sich die Firma Marktvorteile für die Funkmodule. Deren Grundprinzip lässt sich aber auch noch variieren. Die Energiewandler könnten beispielsweise Wärmeunterschiede zur Spannungserzeugung nutzen. Zwei bis drei Grad reichen ihnen zum Senden, das entspricht etwa Temperaturdifferenzen zwischen der Oberfläche von Heizkörpern oder warmen Maschinenteilen und der Raumluft. Auch kleine Solarzellen, wie in Armbanduhren gebräuchlich, können die angeschlossene Elektronik betreiben.

Druck auf dem Sensor, Druck im Reifen

Die zweite Grundkomponente eines Schalters ist ein Mikroprozessor inklusive Software. Da er nur Bruchteile einer Millisekunde betrieben und dazwischen ganz abgeschaltet wird, verbraucht er gerade mal etwa fünfzig Mikrowattsekunden pro Aktion. Zum Vergleich: Mit dieser Energie ließe sich eine Masse von einem Gramm fünf Millimeter hochhe-



ENOCEAN



Spektakuläre Erfindung mit unspektakulärem Innenleben (rechts) – ein batterieloser Funkschalters mit Antenne (roter Draht), im Hintergrund das Gehäuse des Lichtschalters. Oben sieht man die Studie eines Fensterkontakt-Sensors, der von einer Solarzelle versorgt wird.

Das Unternehmen im Profil

Die EnOcean-Gründer entwickelten die batterielose Funktechnik als Mitarbeiter der Siemens AG. 2001, bei Gründung der in Oberhaching bei München ansässigen GmbH, brachte der Konzern 14 Patente ein und hält Unternehmensanteile. EnOcean beschäftigt gegenwärtig zehn Mitarbeiter und will erste Produkte noch in diesem Jahr auf den Markt bringen.

Weitere Informationen unter *www.enocean.com*

ben. Dahinter steckt eine verbrauchsoptimierte Kombination von Standardkomponenten sowie eigenentwickelte Steuerungssoftware.

Dem Prozessor könnten Sensoren Daten liefern, die mit einer Identifikationsnummer versehen via Funktelegramm vom Hochfrequenzsender verschickt werden. Der von EnOcean entwickelte Hochfrequenz-Sender weist einen Wirkungsgrad von fünfzig Prozent auf – herkömmliche Sender dieser Art kommen nur auf einen halb so guten Wert; er verbraucht deshalb nur etwa fünf Milliampere Strom.

Ab 2003 sollen batterielose Funkmodule mit Thermo- und Positionssensoren in industriellen Produktionsanlagen ihren Dienst tun. Für 2004 plant EnOcean einen Bewegungsmelder, der über herkömmliche Infrarot-Sensoren registriert, dass jemand den Raum betritt. Der zugehörige Hochfrequenz-Empfänger nimmt die Funksignale auf und schlägt gegebenenfalls Alarm. Im Jahr darauf soll ein Sensor am Autoreifen während der Fahrt kontinuierlich Luftdruck und Temperatur überwachen. Seine Energie bezieht er dabei aus der Abrollbewegung des Reifens. Bei jeder Umdrehung verformt er sich und gibt diese Änderung an ein piezoelektrisches Element weiter, das an geeigneter Stelle einvulkanisiert ist.

Bei allen guten Vorsätzen: Ende dieses Jahres werden zunächst die kabellosen Lichtschalter und Dimmer auf den Markt kommen. Wenn sie sich in der Konkurrenz zu den herkömmlichen Verfahren der Lichttechnik durchsetzen, hofft EnOcean auf weitere Anwendungen der Energiesparwunder sowohl in der Industrieautomatisierung als auch in der Medizintechnik.

Ulrike Zechbauer

Die Autorin ist Wissenschaftsjournalistin in München.

GEOWISSENSCHAFTEN

Gert Lange (Hg.)
Eiskalte Entdeckungen
Forschungsreisen zwischen Nord- und Südpol
Delius Klasing, Bielefeld 2001. 360 Seiten, € 26,–



Bringen Sie mal über fünfzig Wissenschaftler eines Instituts dazu, allgemein verständlich zu beschreiben, was sie erforschen und zu welchen Ergebnissen sie gekommen sind! Schlimmer noch: Sie sollen uneingeweihten Lesern möglichst anschaulich schildern, wie es bei ihrer Arbeit zugeht, und dabei auch mit eigenem Erleben aufwarten.

Diesem Ansinnen sahen sich Forscher des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven ausgesetzt – ein Einfall ihres Direktors Jörn Thiede. Und siehe da: Sie haben ihre Sache gar nicht schlecht gemacht. Unter der offensichtlich straffen Stabführung des Berliner Wissenschaftsjournalisten Gert Lange als Herausgeber ist ein informativer und lesenswerter Band über die vielfältigen Aspekte der Forschung in den Polargebieten entstanden, ansehnlich ausgestattet mit Fotos oder Grafiken auf nahezu jeder Doppelseite.

Bis vor wenigen Jahrzehnten galten die Polargebiete lediglich als leere Räume, die ungeachtet der dort herrschenden lebensfeindlichen Bedingungen zu durchstreifen und zu besetzen waren. Heute sind sie mit ihren Eismassen als wichtige Komponenten des Systems Erde erkannt, in dem die unterschiedlichen „Sphären" eng miteinander verbunden sind: der Bereich des Eises mit denen des Wassers, der Luft, des Lebens und der festen Erde.

So enthalten die Eiskappen der Erde achtzig Prozent des gesamten irdischen Süßwassers. Mit den Eisbergen und direkt als Abfluss geben sie Wasser ab. Die Verluste werden durch Schneefälle kompensiert. Verändert sich die Balance, steigt oder fällt der Meeresspiegel weltweit, mit weit reichenden Konsequenzen.

Die polaren Meeresregionen sind die Lungen der Ozeane. Nur wo das Wasser an der Oberfläche besonders kalt und damit dicht und schwer wird, kann es bis auf den Grund sinken, Sauerstoff in die Tiefe bringen und gleichzeitig auch einen Teil des Treibhausgases Kohlendioxid aus der Atmosphäre mitnehmen. Extreme Süßwasserschübe aus dem Eis aber verdünnen das salzige Meerwasser und machen es leichter, sodass es weniger tief oder gar nicht mehr absinkt. Dadurch können sich Stärke und Verlauf von Meeresströmungen ändern, was wiederum gravierende Auswirkungen auf das Klima weit entfernter Regionen haben kann.

Mit ihren riesigen eisbedeckten Regionen, die den größten Teil der auftreffenden Sonnenstrahlen reflektieren, üben die Polargebiete ohnehin einen großen Einfluss auf das Klimasystem der Erde aus. Klimaänderungen, die zur Ausdehnung oder Schrumpfung der Eisflächen führen, werden enorm verstärkt.

Zusätzliches Interesse weckten die Polargebiete durch die alljährliche Ausdünnung der Ozonschicht, des Schutzschildes gegen gefährliche ultraviolette Strahlung. Das „Ozonloch" über der Antarktis und ihrer weiteren Umgebung wurde zum Symbol für völlig unerwartete Auswirkungen chemischer Substanzen weitab vom Ort ihres Gebrauchs.

Schließlich bergen die Eismassen einen einzigartigen Schatz: Informationen über das Klima der Vergangenheit (SdW 4/1998, S. 50). Bohrungen erschließen die eisigen Archive, die Aufschluss über Temperaturen und Niederschläge geben und sogar in winzigen Bläschen Proben der Luft aus längst vergangenen Zeiten bewahrt haben. Auf diese Weise kann etwa der damalige Gehalt an den Treibhausgasen Kohlendioxid und Methan bestimmt werden.

Für die „Eiskalten Entdeckungen" haben Wissenschaftler sehr unterschiedlicher Fachrichtungen in die Tasten ihrer PCs gegriffen. Über ihre Untersuchungen auf, im, unter und über dem Eis, in den polaren Meeren, auch in den eisfreien „Oasen" der Antarktis berichten neben den Experten für das Eis (Glaziologen) Ozeanografen, Geologen und Geophy-

Am Eisrand des Kronprinz-Christian-Landes in Nordostgrönland markiert der doppelte, braun gefärbte Saum die Grenze zwischen der heutigen Warmzeit und der letzten, staubreicheren Kaltzeit.

siker, Biologen, Meteorologen und Aerosolforscher. Die Arbeitsbedingungen sind noch immer hart, auch wenn heutzutage Eisbrecher mit Bordbar und Schwimmbad, Flugzeuge, schwere Zugmaschinen und halbwegs komfortable Stationen zum Überwintern zur Verfügung stehen. Die Arbeit ist auch in Überlebensanzügen und trotz moderner Technik nicht ohne Risiko, ob es nun darum geht, die Dicke einer Eisscholle am Nordpol zu messen oder lediglich in unmittelbarer Nähe einer Überwinterungsstation eine meteorologische Routinemessung bei Schneesturm vorzunehmen.

Von all dem gibt das Buch einen guten Eindruck. Gewiss sind die einzelnen Beiträge unterschiedlich ausgefallen, aber eine Zumutung für den Leser ist keiner. Der Herausgeber hat ganze Arbeit geleistet.

Auch das Konzept überzeugt. In einem einführenden Teil über das „Erdsystem" wird die Rolle der Polargebiete für das Ganze eingehend beleuchtet, von der Vereisungsgeschichte der Erde über die Zusammenhänge zwischen Eiskappen, Meeresspiegel und Klima, den Ozean als Wärmemaschine, Beziehungen zwischen Plankton und Kohlendioxid bis zu einem Kapitel über Meerestiere im Klimawechsel. Es folgen die Forschungsberichte aus der Antarktis und der Arktis, dazwischen ein kürzerer Teil mit Berichten aus der Nordsee, dem Meer vor unserer Haustür. Zwanglos entsteht das von den Initiatoren des Buches beabsichtigte Porträt des Alfred-Wegener-Instituts mit seinen vielseitig tätigen 700 Mitarbeitern.

In dem abschließenden Kapitel lässt Gründungsdirektor Gotthilf Hempel die Geschichte des Instituts von 1980 bis heute Revue passieren. Hempel zeichnet eine Erfolgsstory auf, die nach der Vorgeschichte kaum zu erwarten war. Denn alle wissenschaftlichen Gutachter waren sich einig gewesen, dass das geplante Polarinstitut in Kiel angesiedelt werden sollte. In Bremerhaven seien die wissenschaftliche Infrastruktur und das akademische Umfeld zu schwach für den Aufbau eines leistungsfähigen Instituts. Doch für die sozialliberale Bundesregierung zählte damals am Ende die Solidarität mit den Genossen im Land Bremen mehr als aller Sachverstand. In Schleswig-Holstein regierte die CDU.

Tröstlich zu wissen, dass manchmal auch aus einer politischen Lösung Ordentliches werden kann.

Erwin Lausch

Der Rezensent ist promovierter Biologe und Wissenschaftsjournalist mit Schwerpunkt Geologie in Ahrensburg.

CHIRURGIE

Christian Jungblut

Meinen Kopf auf deinen Hals

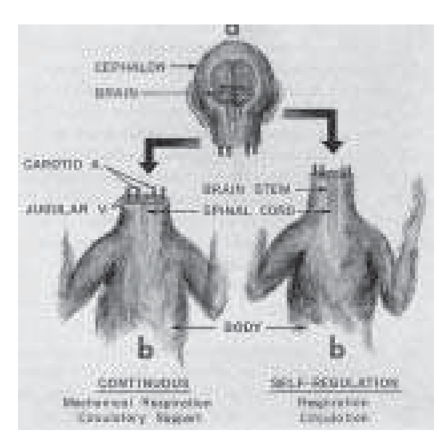
Die neuen Pläne des Dr. Frankenstein alias Robert White

Hirzel, Stuttgart 2001. 189 Seiten, € 24,90

Die Zeit drängt. Der renommierte amerikanische Gehirnchirurg Robert White ist mittlerweile 76 Jahre alt, und er möchte unbedingt der Erste sein, der einen menschlichen Kopf auf einen fremden Körper verpflanzt. Christian Jungblut, ein Hamburger Journalist, hat sich zwei Jahre lang immer wieder mit White getroffen, um diesen doch sehr speziellen Lebenstraum kontrovers zu diskutieren. Die gesammelten Gespräche hat er in einem vielschichtigen, faszinierenden Buch zusammengefasst.

Zunächst ist man geneigt, White nur für einen vom wissenschaftlichen Ehrgeiz getriebenen Dr. Frankenstein zu halten, der seiner Karriere ein letztes Glanzlicht aufsetzen möchte. Aber so einfach ist die Sache nicht, da Jungblut White auch als selbstlosen Menschen beschreibt, der hilft, wo es ihm nur möglich ist. Aber wird einem Menschen tatsächlich geholfen, der wie der Supermann-Darsteller Christopher Reeves vom Hals abwärts gelähmt ist, wenn man seinen Kopf vom Körper trennt, um ihn auf einen „Spenderkörper" zu transplantieren? Das ist die zentrale Frage des Buches.

Ihre Beantwortung hängt maßgeblich davon ab, welcher Philosophie der menschlichen Identität man anhängt. Für Robert White, einen streng gläubigen Katholiken, steht fest, dass die Seele beim lebenden Menschen einzig und allein in dessen Gehirn beheimatet ist. Der Körper ist in seinen Augen nur eine austauschbare Versorgungseinheit – ein „power-pack". Der Mensch ändert sich in seinem Wesen nicht, wenn das zu rettende Gehirn von einem fremden Körper versorgt wird. Folglich wird ihm geholfen, wenn man sein Gehirn auf einen besser funktionierenden Spenderkörper transplantiert. Jungblut dagegen vertritt die Auffassung, dass die menschliche Identität untrennbar mit dem eigenen Körper verbunden sei. Er möchte seinen Kopf deshalb nicht auf einem fremden Körper sehen.



Zu Forschungszwecken transplantiert White Köpfe von Rhesusaffen.

Wer hat Recht? Das Buch gibt keine Antwort – kann es auch nicht geben.

Marco Wehr

Der Rezensent ist promovierter Philosoph und Diplom-Physiker. Er arbeitet als freier Autor in Tübingen.

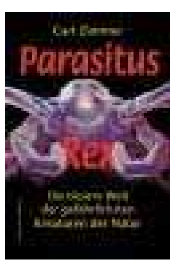
ZOOLOGIE

Carl Zimmer

Parasitus Rex

Die bizarre Welt der gefährlichsten Kreaturen der Natur

Aus dem Amerikanischen von Monika Curths.
Umschau Braus, Frankfurt am Main 2001. 272 Seiten, € 19,90



Vom biologischen Standpunkt aus gesehen ist der allgemeine Abscheu der Menschen gegenüber Schmarotzern schlecht begründet. Parasitismus ist unter den Lebewesen vollkommen üblich: Mehr als 50 Prozent von ihnen beziehen ihre Nahrung von einem artfremden Wirt.

Aus einer sehr menschlichen Sichtweise – indem er Parasiten zweckgerichtetes, wohldurchdachtes Handeln unterstellt – beschreibt der preisgekrönte amerikanische Wissenschaftsjournalist Carl Zimmer, mit welchen Tricks sie sich im Wirt orientieren, sich häuslich einrichten und möglichst vielen Nachkommen möglichst gute Startchancen verschaffen.

Da der Eindringling den Wirt zum Überleben braucht, dieser den ungebetenen Gast aber loswerden will, herrscht zwischen ihnen ein permanenter Kampf. Anhand verschiedener Beispiele erklärt der Autor, wie geschickt Parasiten die Abwehrmechanismen überlisten und welche Waffen das Immunsystem des Wirts gegen den Eindringling bereithält.

Haben sie sich erst eingenistet, werden viele Parasiten äußerst boshaft: Sie übernehmen schließlich sogar die Kontrolle über den Wirt und steuern dessen Verhalten, sodass es nun dem Eindringling nützlich ist. Mit der Angst vor einer solchen Fremdsteuerung begründet Carl Zimmer den Horror, der den besonderen Reiz von Filmen wie „Alien" ausmacht.

Die Wissenschaft hat sich mit den Parasiten lange schwer getan. Da man nie einen Wurm in einen Menschen hineinkriechen sah, hielt man konsequenterweise Würmer für Produkte des Menschen und schrieb ihnen nicht den Status eines Lebewesens zu. Noch 1824 erklärte der Leiter der Gesundheitsbehörde von Bombay, bei den „zuckenden Fleischschnüren", die heute als Medinawürmer bekannt sind, könne es sich unmöglich um Tiere handeln.

Im Laufe der Evolution haben sich Schmarotzer optimal an ihren Wirt angepasst: Es gilt, auf dem schmalen Grat zwischen zu aggressiver und zu zurückhaltender Ausnutzung des Wirts zu balancieren, während der Wirt Gegenmaßnahmen ergreift. Diese Wechselwirkung von Wirt und Schmarotzer treibt die Evolution voran und ist möglicherweise sogar verantwortlich für die Entstehung der sexuellen Fortpflanzung.

Zu den Verteidigungsstrategien der Wirte zählen neben einfachen Methoden



Ein Pilz wächst aus einer Ameise heraus.

PREISRÄTSEL

Lösung zu „Auf Teilersuche“ (Mai 2002)

Sei t ein Teiler der Zahl mit der Ziffernfolge ABC, das heißt von $u = 100A + 10B + C$. Außerdem soll t die Zahlen v und w mit den Ziffernfolgen BCA und CAB teilen, also $v = 100B + 10C + A$ und $w = 100C + 10A + B$. Dann muss t auch Teiler von $10u - v = 10\cdot(100A + 10B + C) - (100B + 10C + A) = 999A$ sein. Analog gilt, dass t die Zahlen $10v - w = 999B$ und $10w - u = 999C$ teilt.

Wenn A, B und C nicht alle gleich sind, ist das nur möglich, wenn t selbst ein Teiler von 999 ist. Diese Bedingung ist auch hinreichend, denn wenn ein solches t die Zahl u teilt, dann auch $v = 10u - 999A$ und $w = 10v - 999B$. Also erfüllen alle Teiler von 999 die Bedingung der Aufgabenstellung: 1, 3, 9, 27, 37, 111, 333 und 999 selbst. Der triviale Fall $A = B = C$ liefert als weitere Allesteiler die Zahlen 222, 444, 555, 666, 777 und 888.

Die Gewinner der zehn schwebenden Kugelschreiber „Pen Ultimate“ sind Andreas Lorbach, Eschborn; K. Menny, Ronnenberg; Thomas Redecker, Berlin; Martin Seeger, Nieder-Olm; Wolfgang Alb, Berlin; Rolf Wanka, Paderborn; Waldemar Schwarz, Münster; Falk Lehmann, München; Barbara Schäfer, Rodenbach; und Peter Zorn, Amberg.

Lust auf noch mehr Rätsel? Auf der Website von Spektrum der Wissenschaft (www.spektrum.de) finden Sie jeden Monat in der Rubrik „Rätsel“ eine neue mathematische Knobelei.

wie der Körperpflege raffinierte Verfahren: Manche Pflanzen senden chemische Hilferufe aus, um Insekten anzulocken, die ihrerseits in den Pflanzenschädlingen parasitieren. Affen verzehren vermutlich bei Parasitenbefall gezielt Heilmittel: Pflanzenteile, die sie sonst meiden.

Auch der Mensch hat sich unter dem Einfluss von Parasiten entwickelt: So gibt es erblich bedingte Krankheiten, die den Menschen nur mäßig beeinträchtigen, das Überleben bestimmter Parasiten aber verhindern. Einige Wissenschaftler spekulieren sogar, dass die geistige Entwicklung des Menschen und die Entstehung von Sprache durch Parasiten vorangetrieben wurden.

Der Kampf der Medizin gegen parasitäre Erkrankungen ist nicht zu gewinnen, da Schmarotzer außerordentlich wandlungsfähig sind. Möglicherweise sind Parasiten für die menschliche Gesundheit sogar notwendig. So könnten die entzündlichen Darmkrankheiten Colitis und Morbus Crohn eine Folge fehlenden Wurmbefalls sein.

Parasiten können dem Menschen sogar nützen. So werden sie gezielt zur biologischen Schädlingsbekämpfung eingesetzt. Zimmer gibt Beispiele für grandiose Erfolge wie für spektakuläre Misserfolge der Methode.

Das Buch gipfelt in einem Lobpreis der schmarotzenden Lebensweise. Zimmer schreckt nicht davor zurück, auch den Menschen als Parasiten zu bezeichnen, der dabei ist, seinen Wirt, die Erde, zu Grunde zu richten, und empfiehlt, von den Parasiten zu lernen, die in ihren Wirten nur so viel Schaden wie nötig anrichten.

Das Buch ist ein sehr unterhaltsames Patchwork – mit ab und zu eingestreuten Schauern leichten Ekels. Da die Verhaltensweisen der Parasiten stark vermenschlicht dargestellt sind, kommt der Text locker und leicht verständlich daher. Ergänzt wird er durch einen Fototeil mit ansprechenden Schwarzweißbildern. Sachliche Fehler, das magere Glossar und die fehlenden Literaturhinweise trüben allerdings den positiven Gesamteindruck.

Katrin Schaller

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

Auf Deutsch erschienen

Robert Park
Fauler Zauber
Betrug und Irrtum in den Wissenschaften
Aus dem Amerikanischen von AMS / Dirk Oetzmann.
Europa, Hamburg 2002. 256 Seiten, € 19,90

ist die Übersetzung von „Voodoo Science“ (besprochen in der März-Ausgabe 2001).

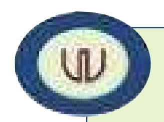




Antonio Damasio
Ich fühle, also bin ich
Die Entschlüsselung des Bewusstseins
Aus dem Englischen von Hainer Kober.
List, München 2000. 456 Seiten, € 26,–;
Ullstein Taschenbuch Verlag, Hamburg 2002. 462 Seiten, € 9,95

ist die Übersetzung von „The Feeling of What Happens“ (besprochen in der Juli-Ausgabe 2000).





5×5 Test® Sachbuch
Top Ten Juli 2002

Die Sachbuch-Rezensionen von wissenschaft-online (http://www.5x5test.de) enthalten eine Punktwertung: Für die Kriterien Inhalt, Vermittlung, Verständlichkeit, Lesespaß und Preis-Leistungsverhältnis vergibt der Rezensent jeweils bis zu fünf Punkte. Die Liste führt die zehn Bücher mit den höchsten Gesamtpunktzahlen auf (Erscheinungszeitraum der Rezensionen: 22. April bis 1. Juli 2002).

1. David Quammen  23 Punkte
   Die zwei Hörner des Rhinozeros
   Kuriose und andere Geschichten vom Verhältnis des Menschen zur Natur
   Claassen, 384 Seiten, € 21,00
2. David Singer — 22
   Welcher Vogel ist das?
   Franckh-Kosmos, 430 Seiten, € 19,90
3. Gerhard Roth — 21
   Fühlen, Denken, Handeln
   Suhrkamp, 488 Seiten, € 29,90
4. Rudolf Piechocki — 21
   Die Zwergmaus
   Westarp Wissenschaften, 126 Seiten, € 19,95
5. P. Gritzmann, R. Brandenberg — 21
   Das Geheimnis des kürzesten Weges
   Springer, 356 Seiten, € 19,95
6. Thomas Junker, Uwe Hoßfeld — 21
   Die Entdeckung der Evolution
   Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 264 Seiten, € 29,90
7. A. Mellinger, S. Hoffmann — 20
   Der große Kosmos Himmelsatlas
   Franckh-Kosmos, 96 Seiten, € 29,90
8. Walter Kirchner  20
   Die Ameisen
   Beck, 124 Seiten, € 7,50
9. Joachim Herrmann — 19
   Welcher Stern ist das?
   Franckh-Kosmos, 176 Seiten, € 6,50
10. Trevor Norton — 17
    In unbekannte Tiefen
    Rütten & Loening, 331 Seiten, € 20,00

Alle rezensierten Bücher können Sie bei wissenschaft-online bestellen:
Tel.: 06221/9126-841,
Fax: 06221/9126-869,
E-Mail: shop@wissenschaft-online.de

www.science-shop.de



PHILOSOPHIE

Peter Bieri
Das Handwerk der Freiheit
Über die Entdeckung des eigenen Willens
Hanser, München 2001. 446 Seiten, € 24,90



Gibt es in der Philosophie einen Fortschritt, der dem Erkenntnisgewinn der Naturwissenschaften vergleichbar wäre? Auf den ersten Blick scheint das Denken der Philosophen immer wieder um dieselben alten Fragen zu kreisen, ohne sie je abschließend lösen zu können. So das Problem der Willensfreiheit: Wenn die Welt Gesetzen folgt, bestimmen sie auch unser Handeln – also sind wir nicht frei. Doch wenn wir handeln, erleben wir uns nicht nur als frei, sondern werden auch für unsere Taten zur Verantwortung gezogen – also sind wir doch frei.

Der Philosoph Peter Bieri, der an der Freien Universität Berlin lehrt, vermittelt dem Leser das spannende Erlebnis eines echten Fortschritts der Philosophie. Bieris Methode ist einerseits phänomenologisch. Er beschreibt alltägliche Szenen und Erfahrungen so unvoreingenommen, eingehend und plausibel, dass der Leser sich diesen Schilderungen nicht entziehen mag, sondern gern zugibt: Ja, genau so ist es. Andererseits ist Bieris Phänomenologie durch die Schule der sprachkritischen Philosophie gegangen; er ist stets auf der Hut, nicht einer Suggestion durch nahe liegende Sprechmuster zum Opfer zu fallen. Diese Verbindung von Phänomenologie und Sprachkritik macht den großen Reiz des Buches aus. Man wird Zeuge eines Fortschritts der philosophischen Methode, und man ist bei der Ernte der Resultate dabei.

Zunächst erlebte ich als Leser allerdings nicht diesen Gewinn, sondern eine Enttäuschung. Ich hatte erwartet, Bieri werde das Problem der Willensfreiheit in der speziellen, zugespitzten Form behandeln, wie es sich durch die moderne Hirnforschung aufdrängt. Je mehr die Wissenschaft Denkvorgänge als hirnphysiologische Prozesse zu beschreiben vermag, desto mehr scheint sie unser subjektives Erleben als pure Illusion zu entlarven (siehe auch Bieris Beitrag in Spektrum der Wissenschaft 10/1992, S. 48). Wir meinen eine Farbe zu erleben, aber „in Wahrheit" verarbeiten spezielle Hirnregionen bestimmte Sinnesdaten in Form elektrochemischer Impulse. Wir meinen eine willkürliche Handlung auszuführen, aber „in Wahrheit" laufen kausal bedingte Reaktionen auf bestimmte Reize ab.

Tatsächlich befasst sich Bieri in seinem Buch nicht mit diesem Problem der Willensfreiheit als Widerspruch zwischen subjektiv erlebter Freiheit und objektiver Naturgesetzlichkeit der Hirnvorgänge. Am Ende des Buches erkennt der Leser, dass das Problem sich erledigt hat. Der Autor schafft es stillschweigend aus der Welt, indem er anhand plastisch geschilderter Alltagssituationen die Schimäre unbedingter Freiheit entlarvt.

Das Wort „frei" suggeriert uneingeschränkte Handlungsspielräume; es bezieht sein Pathos aus der negativen Erfahrung, durch allerlei Hindernisse, Regeln, Fesseln eingeschränkt zu sein; wir möchten *frei von* solchen Widerständen sein (sogar, ergänzt der mitdenkende Leser, von den „Gesetzen", denen die Hirnvorgänge „gehorchen"). Andererseits möchten wir, wenn wir eine Absicht verfolgen, *frei zu* diesem Handlungsziel sein. Wie Bieri nun zeigt, wäre es unmöglich, ein gewolltes Ziel „frei" zu erreichen, wenn wir zugleich völlig frei *von* Bedingungen, Regeln, vorgegebenen Tatsachen wären – insbesondere (so ergänzt der mitdenkende Leser) frei vom regelmäßigen Funktionieren unseres Gehirns. (In einem solchen Ausnahmefall müsste ein Täter vor Gericht als unzurechnungsfähig freigesprochen werden.)

Freiheit existiert nur als bedingte Freiheit. Unser Wille agiert in einem strukturierten Feld; er hat eine Vorgeschichte. Das enthebt uns nicht der Verantwortung für das, was wir tun – selbst wenn es im Nachhinein aussieht, als ob „alles so kommen musste".

Um solche Einsichten zu erzeugen, kommt Bieri immer wieder auf Dostojewskis Romanhelden Raskolnikov aus „Verbrechen und Strafe" (besser bekannt unter dem Titel „Schuld und Sühne") zurück, dessen Mordtat wir aus der Innenperspektive so intensiv miterleben, als wäre es unsere. Sind „wir" für die Tat verantwortlich, oder dürfen wir auf mildernde Umstände plädieren, da uns Dostojewski die Tat doch so plausibel macht, als hätte Raskolnikov gar nicht anders handeln können? Die Antwort ist nicht leicht – Bieri braucht ein ganzes Buch dafür –, doch die Mühe lohnt sich.

Michael Springer

Der Rezensent ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.

Die Tücken der visuellen Wahrnehmung

Neben den altbekannten optischen Täuschungen und Vexierbildern bietet das Internet verblüffende Wahrnehmungserlebnisse: mit bewegten Bildern.

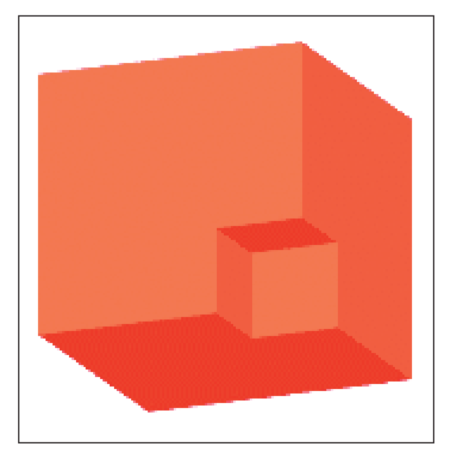
Von Christoph Pöppe

Optische Täuschungen wie der nur scheinbar gekrümmte Balken über aufgefächerten Linien lehren uns seit jeher, dass das Sehsystem im Gehirn eine Menge Interpretationsarbeit leistet, bevor uns eine visuelle Wahrnehmung zu Bewusstsein kommt. Manche Bilder bringen unser Sehsystem ins Schleudern, weil sie zwei verschiedene Interpretationen zulassen oder jede denkbare räumliche Interpretation auf Widersprüche führt. Salvador Dalí, Maurits C. Escher und viele andere Künstler haben intensiv mit diesen Möglichkeiten gespielt.

Wie fast alles Gedruckte finden sich auch diese Bilder im Internet wieder. www.zauberbuch.de/trick6.htm, http://scherzbolt.no-ip.org/scherzbolt/illusion1.htm, http://home.arcor.de/stealb/witzig/optische/optische.htm#mandog und http://deecee.onlinehome.de/Trick.html bieten umfangreiche Sortimente. Liebevoller gemacht ist die Webseite eines unermüdlichen Gestalters mit dem Künstlernamen Jovalli. Klicken Sie sich auf www.kelsen.de/jovalli/jll.html bis zu den „optischen Täuschungen“ durch.

Martina Schönemann von der Technischen Universität Berlin erläutert die „unendliche Treppe“ Eschers und einige andere widersprüchlich zu interpretierende Bilder (www-sfb288.math.tu-berlin.de/vgp/unheard/ma-freizeit/freizeitweb/optic/optics.html).

Richtig neue und überraschende Erlebnisse bietet das Medium Internet mit der Möglichkeit, bewegte Bilder zu zeigen. Die Anzahl der erforderlichen Einzelbilder ist überraschend gering, was zu erträglichen Ladezeiten führt. Erwin Purucker bietet auf www.panoptikum.net/optischetaeuschungen/index.html etwas ausgefallenere Animationen.



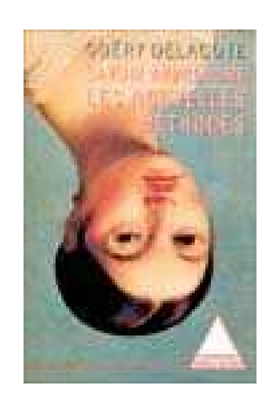
Dreifache Interpretation: Ist aus dem Würfel, der vor uns schwebt, ein Eckstück ausgeschnitten, oder hängt ein kleinerer, anders orientierter Würfel daran? Oder liegt der kleine Würfel in der hinteren Ecke eines Zimmers, von dem man nur Boden und zwei Wände sieht? Aus www.sandlotscience.com.

Mit Java kann man sich auf Mark Newbolds Seite (neben vielen anderen Dingen) auch die Pulfrich-Täuschung ansehen (www.dogfeathers.com/java/pulfrich.html): Man dunkle zum Beispiel mit einem Sonnenbrillenglas ein Auge ab. Das verdunkelte Auge nimmt sein Bild verzögert wahr; da sich das Bild bewegt, sehen beide Augen verschiedene Bilder: das helle das aktuelle und das dunkle ein um wenige Hundertstelsekunden veraltetes, wodurch merkwürdige Stereoeffekte zustande kommen.

Auf www.dogfeathers.com/java/necker.html neckt Newbold den Betrachter mit dem Necker-Würfel, jenem Vexierbild, das auf zwei verschiedene Arten als Würfel interpretierbar ist, indem er durch hindurchschlüpfende Hunde oder Turmspringer abwechselnd die eine und die andere Interpretation erzwingt.

Wie abhängig unsere Wahrnehmung von Vorerfahrungen ist, belegt die rotierende Gesichtsmaske unter www.kyb.tuebingen.mpg.de/bu/demo/index.html. Unser Sehsystem kann einfach nicht glauben, dass eine sichtbare Nase von uns weg statt auf uns zu weist, und verfällt statt dessen auf die abenteuerlichsten Interpretationen.

Ob man einen bewegten Körper als starr wahrnimmt oder nicht, hängt nicht unbedingt von der Realität ab. In den Animationen von Yair Weiss and Edward H. Adelson von der Universität von Kalifornien in Berkeley (www.cs.berkeley.edu/~yweiss/ellipse.html) wackeln die Ellipsen immer und schwabbeln nie. Gleichwohl sehen wir unweigerlich dünne Ellipsen als wackelnd, dicke als schwabbelnd. Nur zusätzliche Bildelemente, die mit der Ellipse selbst nicht einmal zusammenhängen müssen, können unser Wahrnehmungssystem umstimmen.



Bei einem kopfstehend präsentierten Gesicht fällt dem Betrachter nicht auf, dass Augen und Mund nicht ebenfalls „auf dem Kopf“ stehen, sondern richtig orientiert sind. Aber drehen Sie das Heft einmal um!

Zum Thema „Wahrnehmungsillusionen“ steht ein Artikel aus „Geo-Wissen“ vom März 2002 samt weiteren hilfreichen Verweisen im Netz (www.geo.de/themen/medizin_psychologie/wahrnehmung/index.html?SDSID=2018020000-0011021285598).

Aber die schönste Illusions-Website stammt von einer Firma für Illusionsspielzeuge (www.sandlotscience.com) aus Kalifornien. Wer Java hat zu sehen, der staune! ■



Wer oder was ist das? Eine traditionelle Jesus-Darstellung mit langem Haar, Bart und weißer Robe; der obere Bildrand durchschneidet die Stirn in der Mitte. Die Interpretation ist äußerst schwer zu finden; aber wer sie einmal hat, kann sie kaum wieder aufgeben.

Echte Knoten

Mit einer neuen „Knotentheorie" kommen die Mathematiker den Schlingen aus echten Seemannstauen schon näher als mit abstrakten topologischen Kurven.

Von Ian Stewart

Die Knotentheorie wuchs im letzten Jahrhundert zu einem wichtigen mathematischen Forschungsgebiet heran. Knoten verkörpern eine der großen Fragen der Topologie: Welche Möglichkeiten gibt es, eine geometrische Form in eine andere einzubetten? Im Falle von Knoten sind die beiden Formen ein Kreis – den man sich als ein ringförmig geschlossenes Stück Schnur oder Gummiband vorstellen darf – und der gesamte dreidimensionale Raum. Bekanntlich schert sich ein Topologe nicht darum, ob eine solche Form vergrößert, verkleinert, verbogen oder sonstwie verzerrt wird. Nur stetig müssen diese Deformationen sein; Zerschneiden und Zusammenkleben sind nicht erlaubt. Für den Topologen ist ein Knoten ein Kreis, der im dreidimensionalen Raum derart eingebettet ist, dass er nicht entwirrt werden kann, indem man den umgebenden Raum stetig deformiert.

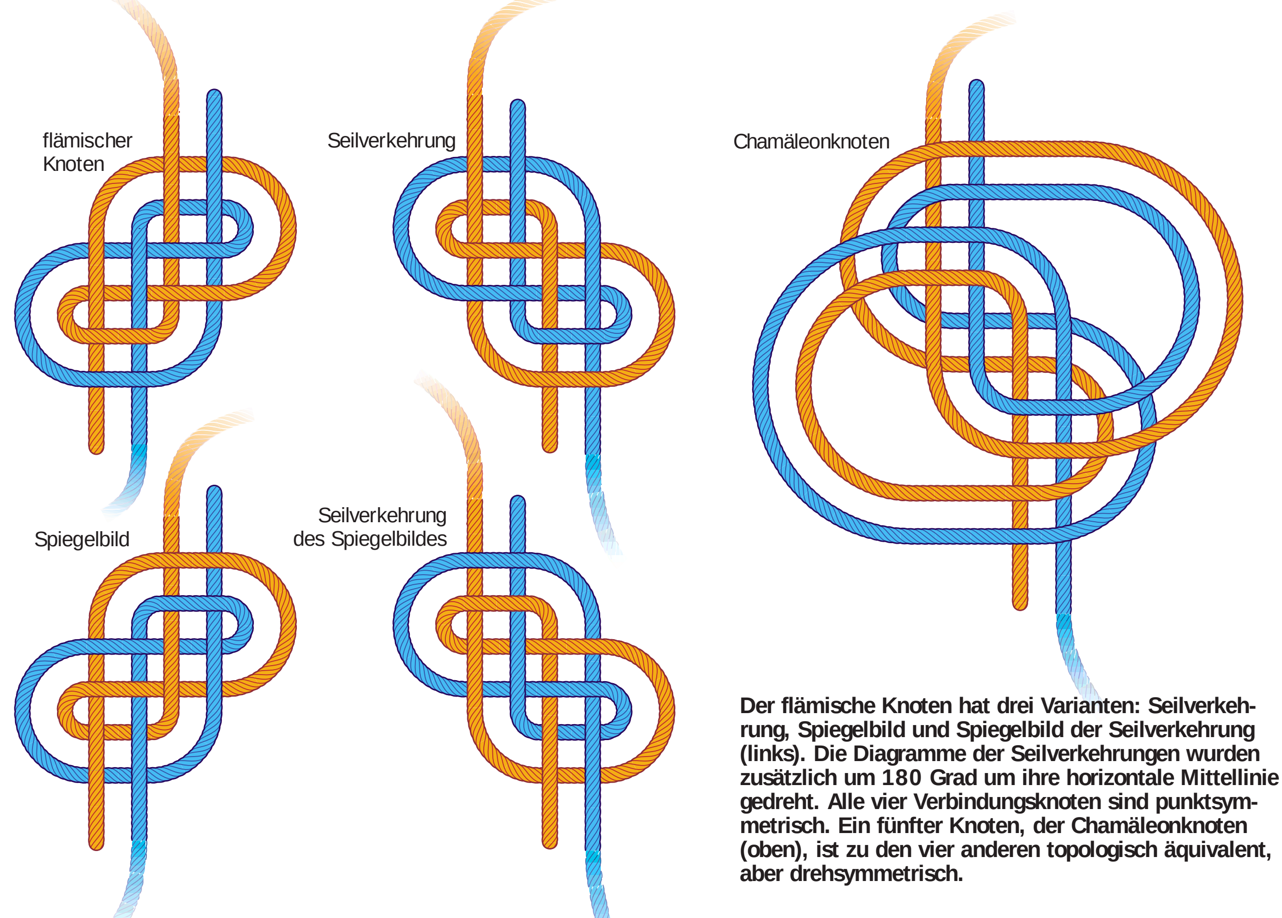
Mit Knoten im landläufigen Sinne hat das nicht viel zu tun. In der Wirklichkeit haben Schnüre Enden, und wenn man versucht, einen Knoten zu entwirren, dann deformiert man die Schnur und nicht den sie umgebenden Raum. Entsprechend gibt die mathematische Knotentheorie zwar Auskunft über die „Knotigkeit" eines Knotens – zum Beispiel darüber, wie mühsam es ist, ihn aufzudröseln –, aber weniger über Probleme praktischer Bedeutung: Wie verlängert man eine Schnur durch Anknoten einer zweiten Schnur, ohne dass der Knoten aufgeht? Hier kommt es entscheidend auf die Reibung der Stränge gegeneinander und damit auf die Materialeigenschaften an, und ein anderes Vorgehen ist erforderlich.

Einige Mathematiker haben in der Tat die Anfangsgründe einer Theorie für „echte" Knoten entwickelt, allen voran Roger E. Miles von der australischen National University in Canberra mit seinem unorthodoxen Buch „Symmetric Bends". „Bend" ist das englische Wort für einen Knoten, der zwei Seile verbindet. Miles will diese Verbindungsknoten systematisch nach geometrischen Kriterien klassifizieren, um so insbesondere neue Knoten mit bestimmten Eigenschaften wie großer Haltbarkeit zu finden.

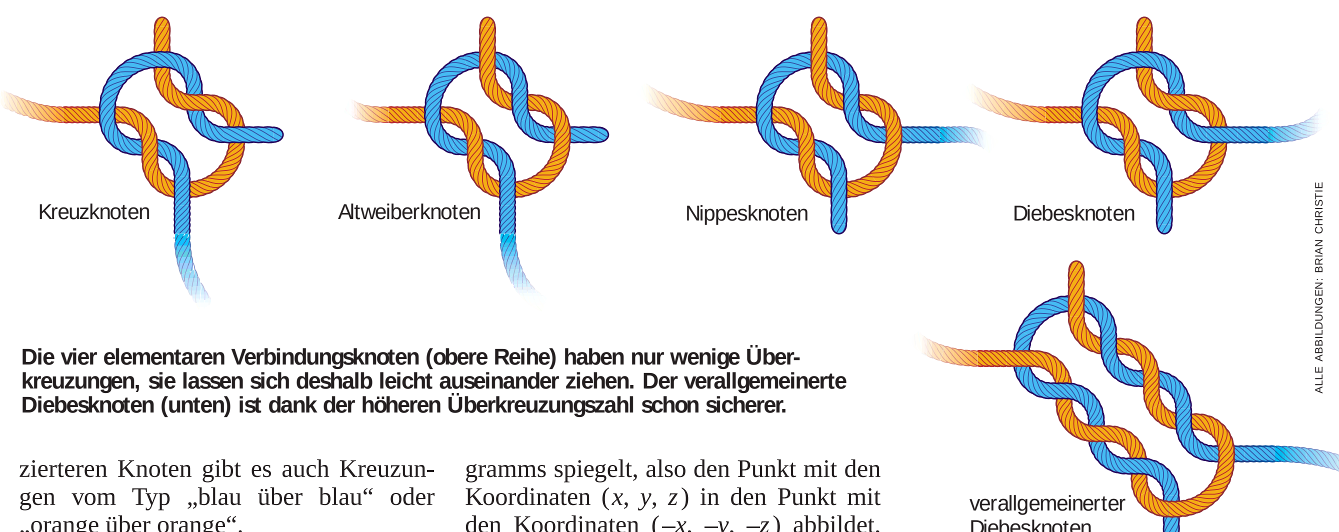
Wie in der klassischen Knotentheorie pflegt man auch die Verbindungsknoten durch „Diagramme" darzustellen, Abbildungen des plattgedrückten Knotens, und aus diesen Diagrammen, vor allem aus dem Muster der Überkreuzungen, möglichst viel herauszulesen. Die Frage, ob zwei Diagramme zum selben Knoten gehören, ist das Grundproblem der herkömmlichen Knotentheorie (Spektrum der Wissenschaft 1/1991, S. 66).

Elementare Verbindungsknoten

Der einfachste und bekannteste Verbindungsknoten ist der Reff- oder Kreuzknoten (Bild rechts). In den Diagrammen ist das eine Seil orange, das andere blau dargestellt. Jedes Seil hat eine „freies" Ende – das kurze Ende, das vom Knoten absteht – und ein „stehendes" Ende, das den Hauptteil des Seiles bildet und hier als verblassende Linie gezeichnet ist. Das Diagramm des Knotens zeigt zwei Arten von Überkreuzungen: blau über orange und orange über blau. In kompli-



Der flämische Knoten hat drei Varianten: Seilverkehrung, Spiegelbild und Spiegelbild der Seilverkehrung (links). Die Diagramme der Seilverkehrungen wurden zusätzlich um 180 Grad um ihre horizontale Mittellinie gedreht. Alle vier Verbindungsknoten sind punktsymmetrisch. Ein fünfter Knoten, der Chamäleonknoten (oben), ist zu den vier anderen topologisch äquivalent, aber drehsymmetrisch.



Die vier elementaren Verbindungsknoten (obere Reihe) haben nur wenige Überkreuzungen, sie lassen sich deshalb leicht auseinander ziehen. Der verallgemeinerte Diebesknoten (unten) ist dank der höheren Überkreuzungszahl schon sicherer.

zierteren Knoten gibt es auch Kreuzungen vom Typ „blau über blau“ oder „orange über orange“.

Der Kreuzknoten wird oft mit dem Altweiberknoten verwechselt. Wenn man das freie Ende jedes Seils mit dem stehenden zu einer geschlossenen Schleife verbindet, erhält man in beiden Fällen einen Knoten – genauer: eine Verkettung – im Sinne der klassischen Knotentheorie. (Diese arbeitet ohnehin nur mit geschlossenen Kurven.) Diese geschlossenen Knoten haben keine nahen Verwandten, aber es gibt zwei weitere Verbindungsknoten, die dem Kreuz- und dem Altweiberverbindungsknoten sehr ähneln. Sie unterscheiden sich nur darin, welches das freie und welches das stehende Ende ist: der Nippesknoten und der Diebesknoten.

Die vier genannten elementaren Verbindungsknoten sind diejenigen mit den einfachsten Diagrammen, also mit den wenigsten Kreuzungen. Die Reibung, welche die Seilstücke am Rutschen hindert, entsteht im Wesentlichen an den Überkreuzungen; man würde erwarten, dass ein Knoten umso besser hält, je mehr Überkreuzungen er hat. Aber das ist nicht immer der Fall; es kommt auch auf deren Reihenfolge an. Die vier elementaren Knoten sind allesamt höchst unsicher. Sie lösen sich leicht, wenn an den Enden gezogen oder sonst irgendwie manipuliert wird.

Die elementaren Verbindungsknoten haben noch eine wichtige Eigenschaft: Sie sind symmetrisch. Wenn man den Kreuzknoten um 180 Grad um eine Achse dreht, die im Bild von links unten nach rechts oben verläuft, so erscheint der gleiche Knoten wieder, nur mit vertauschten Farben. Das Gleiche gilt für den Altweiberknoten. Der Nippesknoten hat eine Drehsymmetrie. Er bleibt bis auf die Farben unverändert, wenn man ihn um 180 Grad in der Papierebene dreht. Und der Diebesknoten ist in drei Dimensionen punktsymmetrisch: Wenn man jeden Punkt am Mittelpunkt des Diagramms spiegelt, also den Punkt mit den Koordinaten (x, y, z) in den Punkt mit den Koordinaten $(-x, -y, -z)$ abbildet, dann sieht der Knoten bis auf die Farbvertauschung wieder genauso aus wie zuvor. Am einleuchtendsten sind diese Symmetrien an selbst gebundenen Knoten aus echter Schnur.

Auf der Grundlage der drei beschriebenen Symmetrien diagonale Umwendung, Halbdrehung und Punktspiegelung hat Miles einen Formalismus zum Studium symmetrischer Verbindungsknoten entwickelt, mit dem man auch neue Knoten erfinden kann. So lässt sich als Verallgemeinerung des Diebesknotens eine ganze Familie neuer Knoten erzeugen (Bild oben, rechts). Außerdem kann man auf Verbindungsknoten im dreidimensionalen Raum drei weitere Symmetrieoperationen anwenden:

➤ Spiegelung: Im zweidimensionalen Knotendiagramm läuft das darauf hinaus, dass man alle Überkreuzungen umdreht.

➤ Farbvertauschung: Orange wird blau und umgekehrt.

➤ Seilverkehrung: Das freie Ende jedes Seils wird zum stehenden und umgekehrt.

Der schönste unter den symmetrischen Verbindungsknoten ist der doppelte Achtknoten oder flämische Knoten. Die ersten vier Darstellungen im Bild links zeigen den Knoten selbst, sein Spiegelbild, seine Seilverkehrung und die Seilverkehrung des Spiegelbildes. Alle vier sind punktsymmetrisch. Die fünfte Darstellung zeigt einen Verbindungsknoten mit einer anderen Symmetrie: Er ist drehsymmetrisch. Dennoch sind alle diese fünf topologisch äquivalent. Das heißt, jeder lässt sich in jeden anderen durch einfache Manipulation an den Seilen verwandeln. Am einfachsten sieht man das, indem man den fünften Knoten, den Miles „Chamäleonknoten“ nennt, in die anderen vier transformiert. Ich gönne Ihnen den Spaß, selbst herauszufinden, wie das geht.

Miles’ Buch enthält einen Katalog von sechzig symmetrischen Verbindungsknoten. Aber gibt es darunter so etwas wie einen optimalen Knoten, mit dem man zwei Seile verbinden sollte? Miles sagt: „Eigentlich nicht.“ Denn Widerstand gegen Aufgehen oder Entwirren sind nicht die einzigen Kriterien für einen guten Knoten. Ein Knoten soll auch leicht zu binden und zu lösen sein, man soll die freien Enden ohne große Schwierigkeiten kürzer oder länger machen können, und außerdem soll er noch schön aussehen. Am Ende seines Buches lädt Miles seine Leser ein, ihm ihre eigenen Entdeckungen mitzuteilen. Vielleicht nimmt er sie dann in eine neue Auflage seines Buches auf. (Seine Adresse ist RMB 345, Queanbeyan NSW 2620, Australien.) Miles schreibt: „Der Erfinder eines neuen Knotens hat das Vorrecht, ihm einen Namen zu geben! Das ist wie bei der Entdeckung einer neuen Nova oder eines neuen Kometen.“ ■

Literaturhinweise

Outdoor-Handbuch Knoten. Von Cliff Jacobson. Conrad Stein, Kiel 2000.

Das Ashley-Buch der Knoten. Von Clifford W. Ashley. Delius Klasing, Bielefeld 1999.

Das BLV Knoten-Handbuch. Von Des Pawson. BLV, München 1988.

Physikalische Spielereien mit Knoten. Von Jearl Walker. Experiment des Monats, Spektrum der Wissenschaft 10/1983, S. 140.

Symmetric Bends. Von Roger E. Miles. World Scientific, 1995.

Ian Stewart *ist Professor für Mathematik an der Universität von Warwick in Coventry (England).*

Kosmos im Gammalicht

Mit außergewöhnlichen Teleskopen im Hochland von Namibia registrieren Astrophysiker schwache Lichtblitze in der Atmosphäre – und untersuchen auf diese Weise hochenergetische Vorgänge in exotischen Himmelsobjekten wie Supernova-Überresten, Schwarzen Löchern und aktiven Galaxienkernen.

Ein Tal der Könige in Sibirien

Antiken Schriften zufolge zogen die kriegerischen Skythen einst von den eurasischen Steppen bis nach Mesopotamien und Persien. Archäologen suchen nach der Wahrheit in den skythischen Grabhügeln Sibiriens.



Der Tanzboden der Bienen

Wenn die Honigsammlerinnen in ihrer Tanzsprache kommunizieren, treten sie den Boden mit Füßen. Ihre Wabe dient ihnen dabei überraschenderweise als telefonisches Festnetz für Ortsgespräche.



Weitere Themen im August

Spin-Elektronik

Miniaturisierung des Computers auf die Spitze getrieben: Ein Bit wird durch nichts weiter realisiert als den Spin, eine Eigenschaft eines einzigen Elektrons.

Geht's der Umwelt immer besser?

Bjørn Lomborgs heiß umstrittenes Buch „The Skeptical Environmentalist“ – soeben deutsch als „Apokalypse: No!“ erschienen – bezichtigt Klimaforscher, Bevölkerungswissenschaftler und Artenschützer der Panikmache. Drei Experten wehren sich.

Altern: Unaufhaltsam

Gerontologen sehen das Altern als natürlichen Vorgang, der nicht von genetischen Programmen gesteuert wird. Jungbrunnen aller Art, angefangen bei Vitaminpillen, halten ihn nicht auf. Gegen das Altern selbst ist bisher kein Kraut gewachsen.